

# **KLIBAU – Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens**

Endbericht

## **Forschungsprogramm**

Zukunft Bau, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI)

## **Projektlaufzeit**

August 2018 bis November 2019

## **Aktenzeichen**

SWD – 10.08.17.7-18.33

## **Im Auftrag**

des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

## **bearbeitet von**

Dr.-Ing. Marc-Steffen Fahrion, Werner Sobek Green Technologies GmbH, Stuttgart  
Prof. Dr. Susan Draeger, Werner Sobek Green Technologies GmbH, Stuttgart  
Dr. rer. nat. Michael Lakatos, ProOkios, Kaiserslautern  
Prof. Dr. sc. hum. MArch. Dipl.-Ing. Timo Schmidt, Hochschule Augsburg, Augsburg  
M. Eng. Christoph Nickl, Werner Sobek Green Technologies GmbH, Stuttgart  
M. Sc. Moritz Brombacher, Werner Sobek Green Technologies GmbH, Stuttgart  
M. Sc. Deekshitha Bangalore, Werner Sobek Green Technologies GmbH, Stuttgart  
Dr.-Ing. Wolfgang Sundermann, CST CumSolTec GmbH, Stuttgart



## INHALTSVERZEICHNIS

1.	Kurzfassung / Summary	6
1.1.	Deutsche Version	6
1.2.	English Version	10
2.	Einführung	13
2.1.	Motivation	13
2.2.	Aufgabenstellung	13
2.3.	Abgrenzung	14
2.4.	Begriffsdefinitionen	16
3.	Musterliegenschaft	17
4.	Untersuchte Klima- und Umweltpotentiale	20
4.1.	Lebenszyklusanalyse	20
4.1.1.	Festlegung des Ziel- und Untersuchungsrahmens	20
4.1.2.	Sachbilanz und Wirkungsabschätzung	21
4.2.	Rückbaubarkeit und Rezyklierbarkeit	22
4.3.	Regenwasserretention	23
4.4.	Verbesserung des Mikroklimas	23
4.5.	Erhöhung der Biodiversität	24
4.6.	Feinstaubbindung	25
5.	Analyse des momentanen Klimas sowie der erwarteten Klimaänderungen	27
5.1.	Sommerhitze	27
5.2.	Starkregen	31
5.3.	Hochwasser	38
5.4.	Hagel	41
5.5.	Sturm	45
6.	Definition der Expositionsclassen	51
6.1.	Sommerhitze	51
6.1.1.	Simulationsumgebung	51
6.1.2.	Anforderungen und Randbedingungen nach DIN 4108-2:2013-02	51
6.1.3.	Planungsgrundlagen	55
6.2.	Starkregen	68
6.3.	Hochwasser	71
6.4.	Hagel	72
6.5.	Sturm	73
7.	Bautechnische Handlungsempfehlungen und deren mögliche Klima- und Umweltpotentiale	74
7.1.	Konstruktionen	74
7.2.	Außenanlagen	83
7.2.1.	Ökobilanzielle Betrachtung von Wegen und Stellplätzen	83
7.2.2.	Holzterrasse	86
7.2.3.	Rasengitter-Platten	86
7.3.	Sommerhitze	88
7.3.1.	Verglasung	89
7.3.2.	Sonnenschutz	93
7.3.3.	Kühlen in Einfamilienhäusern	96
7.3.4.	Dach	100
7.4.	Starkregen	108
7.4.1.	Standortwahl	108
7.4.2.	Starkregengefahrenkarten	111
7.4.3.	Fassade	112

7.4.4.	Dach.....	115
7.4.5.	Außenanlage.....	129
7.5.	Hochwasser.....	131
7.5.1.	Grundsätzlicher Umgang mit der Einwirkung.....	131
7.5.2.	Standortwahl.....	134
7.5.3.	Klimaanpassungskonzept für die Einwirkung Hochwasser.....	134
7.5.4.	Keller.....	135
7.5.5.	Fußboden.....	150
7.5.6.	Außenwand.....	158
7.6.	Hagel.....	167
7.6.1.	Raffstore und Rollläden.....	168
7.6.2.	Lichtkuppeln und Dachoberlichter.....	169
7.6.3.	Dächer.....	169
7.6.4.	Außenwände.....	171
7.6.5.	Photovoltaik und Solarthermie.....	172
7.7.	Sturm.....	173
7.7.1.	Dach.....	174
7.7.2.	Fassade.....	178
8.	Handlungsempfehlungen für die Gebäudebegrünung und Außenanlagengestaltung.....	180
8.1.	Glossar.....	180
8.2.	Motivation.....	180
8.3.	Potentiale der Pflanzenauswahl – Invasive Konkurrenz.....	181
8.4.	Größere Umweltpotentiale und Nachhaltigkeit durch regionale Arten.....	183
8.5.	Sensitivitätsanalyse Klima- und Umweltpotentiale durch Begrünung.....	187
8.5.1.	Entwicklung einer Sensitivitätsanalyse.....	187
8.5.2.	Dachbegrünung.....	187
8.5.3.	Fassadenbegrünung.....	192
8.5.4.	Pflanzenverwendung in Außenanlagen.....	199
8.6.	Innovativer Naturschutz in den Städten durch Ex-situ Ansiedlung gefährdeter Pflanzengesellschaften.....	204
8.7.	Erhöhungen der Synergien durch eine geeignete Kombination.....	206
8.8.	Feinstaubabscheidung.....	207
8.9.	Pflanzenlisten.....	213
8.9.1.	Pflanzenliste für extensive bis semi-intensive Dachbegrünung.....	213
8.9.2.	Kletterpflanzenliste für Fassadenbegrünung.....	215
8.9.3.	Staudenpflanzenliste für semi-intensive bis intensive Dachbegrünungen, Fassadenbegrünung und Außenanlagen.....	216
8.9.4.	Kleingehölzliste für semi-intensive bis intensive Dachbegrünungen, Fassadenbegrünungen und Außenanlagen.....	219
8.9.5.	Baumartenliste für Außenanlagen.....	221
9.	Einfluss der Begrünung auf das Mikroklima und den Innenraumkomfort.....	223
9.1.	Software.....	223
9.2.	Außenraumkomfort.....	223
9.3.	Pflanzenauswahl.....	224
9.3.1.	Begrünung Außenanlage.....	224
9.3.2.	Begrünung Flachdach.....	225
9.3.3.	Begrünung Fassade.....	227
9.4.	Musterliegenschaft.....	228
9.4.1.	Ausgangsszenario.....	228
9.4.2.	Dachbegrünung.....	229

9.4.3.	Fassadenbegrünung.....	231
9.4.4.	Begrünung der Außenanlagen.....	233
9.5.	Siedlungsräume.....	235
9.5.1.	Dorfkern.....	236
9.5.2.	Ausgangsszenario .....	237
9.5.3.	Begrünungsszenario 1: Moosdach und Efeufassade .....	238
9.5.4.	Begrünungsszenario 2: Extensive Dachbegrünung und Moosfassade.....	239
9.5.5.	Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung .....	240
9.5.6.	Ausgangsszenario .....	240
9.5.7.	Begrünungsszenario 1: Bäume und Büsche .....	242
9.5.8.	Begrünungsszenario 2: Bäume, Büsche + extensive Dachbegrünung.....	244
9.5.9.	Begrünungsszenario 3: Bäume, Büsche + extensive Dachbegrünung .....	
	+ Moosfassade .....	244
9.5.10.	Begrünungsszenario 1 mit Wasserflächen .....	246
9.5.11.	Helle Straßenoberflächen .....	253
9.5.12.	Auswirkungen der Außenanlagen- und Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima.....	255
10.	Checklisten.....	259
10.1.	Keller.....	260
10.2.	Fußbodenaufbau .....	261
10.3.	Außenwand .....	262
10.4.	Dach.....	264
10.5.	Dachaufbauten.....	268
10.6.	Außenanlagen.....	269
11.	Zusammenfassung und Ausblick.....	271
11.1.	Zusammenfassung .....	271
11.2.	Ausblick .....	272
12.	Literaturverzeichnis .....	274
	Abbildungsverzeichnis .....	296
	Tabellenverzeichnis .....	303
	Impressum .....	308

## 1. Kurzfassung / Summary

### 1.1. Deutsche Version

Die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels sind schon heute spürbar und werden sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts noch wesentlich verstärken. Auf die sich abzeichnenden Veränderungen muss auch das Bauwesen reagieren. Die reine Klimaanpassung hat zum Ziel, Gebäude auf zukünftig zu erwartende Klimateinwirkungen und Extremereignisse zu dimensionieren, damit sie die heutigen Anforderungen auch mittel- bis langfristig erfüllen. Dadurch werden Schäden am Gebäude vermieden oder verringert sowie behagliche und der Gesundheit zuträgliche Innenraumbedingungen gesichert. Das im vorliegenden Projektbericht thematisierte **klimaangepasste Bauen** betrachtet darüber hinaus auch die Auswirkungen der gewählten Konstruktionen auf die lokale und globale Umwelt. Die betrachteten Klima- und Umweltpotentiale sind auf Bauteilebene die Reduktion des Treibhauspotentials, die Einsparung Grauer Energie und die sortenreine Rückbaubarkeit. Auf Liegenschaftsebene sind es die Verbesserung des Mikroklimas, die Regenwasserrückhaltung, die Erhöhung der Biodiversität und die Reduktion der Feinstaubbelastung.

Die Maßnahmen zum klimaangepassten Bauen werden anhand einer vorgegebenen Musterliegenschaft innerhalb Deutschlands untersucht. Der exakte Standort der Musterliegenschaft ist nicht definiert. Es handelt sich um ein freistehendes Einfamilienhaus inklusive des zugehörigen Grundstücks. Da es sich um einen Neubau handelt, können die Baukonstruktionen frei gewählt werden. Für jede Bauteilgruppe wie z.B. Decken und Wände werden verschiedene Varianten aufgezeigt.

Im Rahmen des Projekts werden die Klimateinwirkungen Sommerhitze, Starkregen, Hochwasser, Hagel und Sturm untersucht. Auf Grundlage einer ausführlichen Literaturanalyse werden für jede Klimateinwirkung die durch Auswertung von Beobachtungsdaten festgestellten sowie die über Klimamodelle projizierten Veränderungen aufgezeigt. Für die Einwirkung Sommerhitze sind die Änderungssignale am eindeutigsten. Bereits heute kann auf Grundlage von Ex-post-Analysen eine eindeutige Zunahme der Anzahl von heißen Tagen, der Andauer von Hitzeperioden und der Sommertemperaturen festgestellt werden. In Abhängigkeit der zugrunde gelegten Emissionsszenarien ergeben sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts teils erhebliche weitere Steigerungen. Auch für die Einwirkung Starkregen wird zukünftig eine Intensivierung erwartet. Dabei wird sowohl die Anzahl als auch die Intensität von Starkregenereignissen zunehmen. Dies resultiert unter anderem aus der erhöhten Wasseraufnahmekapazität der Atmosphäre aufgrund des Temperaturanstiegs. Die beobachteten Klimadaten lassen zudem auf eine Zunahme der Wasserstandshöhen bei niederschlagsinduzierten Flusshochwassern schließen. Aus den Beobachtungsdaten und Klimaprojektionen für die Einwirkungen Hagel und Wind sind keine eindeutigen Änderungssignale ableitbar. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass Hagelereignisse sehr kleinskalig und Windböen sehr kurzzeitig auftreten und folglich mit der räumlichen und zeitlichen Auflösung von Klimamodellen nicht übereinstimmen. Prinzipiell ist bei der Einwirkung Hagel innerhalb Deutschlands eine Zunahme der Exposition von Nord nach Süd festzustellen. Von der Einwirkung Wind sind Küstenbereiche grundsätzlich stärker betroffen.

Aufbauend auf der Auswertung der Änderungssignale werden für jede Klimateinwirkung drei Expositionsklassen definiert. Durch die Expositionsklassen können allgemeingültige Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Einwirkungen getroffen werden. Sie dienen gleichzeitig als Bemessungsgrundlage für durchgeführte Anpassungsmaßnahmen. Da eine Anpassung von Gebäuden an stärkere Hagelereignisse mit relativ geringem Aufwand möglich ist, wurden trotz der unklaren Änderungssignale erhöhte Expositionsklassen im Vergleich zum Ist-Zustand definiert.

Auf Grundlage der Expositionsklassen werden für jede Einwirkung Anpassungsmaßnahmen aufgezeigt. Dabei werden verschiedene regionaltypische und standardmäßige Bauteilaufbauten untersucht. Weiterhin spielt die Gestaltung der Außenanlagen für die Einwirkung Starkregen und Sommerhitze eine übergeordnete Rolle. Die Untersuchungen zur Einwirkung Sommerhitze basieren zum Großteil auf thermisch-

dynamischen Gebäudesimulationen gemäß DIN 4108-2:2013-02. Erwartungsgemäß verbessert sich die thermische Behaglichkeit im Sommer in den Innenräumen mit steigender thermischer Speichermasse der verschiedenen Bauteilaufbauten. Die Auswahl geeigneter Verglasungsbeschichtungen zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes sollte grundsätzlich durch eine Kombination aus Tageslichtsimulation und thermisch-dynamischer Gebäudesimulation erfolgen. Durch diesen Planungsprozess kann die thermische Behaglichkeit im Sommer deutlich gesteigert und gleichzeitig eine gute Tageslichtqualität sichergestellt werden. Die sorgfältige Auswahl variabler außenliegender Sonnenschutzsysteme in Kombination mit der Verglasung ist einer der wesentlichen Einflussparameter auf den sommerlichen Wärmeschutz. Natürliche Wärmesenken zur Kühlung der Innenräume sollten vorgesehen werden. Hierbei kommen die kühlere Außenluft in der Nacht, das Erdreich oder Grundwasser infrage. Insbesondere wenn Heizungssysteme mit Erdreich- oder Grundwasserwärmepumpen geplant werden, sollten die relativ geringen zusätzlichen Investitionskosten für einen zusätzlichen Wärmetauscher zur rein passiven Kühlung aufgewendet werden. Auch der Einsatz reversibler Wärmepumpen zur aktiven Kühlung bei sehr hohen Sommertemperaturen in Kombination mit Photovoltaikanlagen bietet sich als nachhaltiges zukunftssicheres Konzept an.

Auch die Farbwahl von Bauteiloberflächen kann sich trotz sehr guter Dämmeigenschaften der Bauteile nicht unerheblich auf die Innenraumtemperaturen im Sommer auswirken. Werden bei Warmdachaufbauten mit freiliegender Dachabdichtungsbahn anstelle konventioneller bituminöser Abdichtungsbahnen helle Kunststoffabdichtungen verwendet, lassen sich die Übertemperaturgradstunden im Innenraum bei Massivbauweisen um 10 % und bei Holzbauweisen um 20 % reduzieren. Werden die Abdichtungsbahnen von einer hellen 10 cm dicken Kiesschicht überdeckt, können die Übertemperaturgradstunden um weitere 55 % reduziert werden. Die Farbwahl der Dachbahn wirkt sich zudem auf das Mikroklima aus. Durch die Verwendung von hellen Abdichtungsbahnen kann die Oberflächentemperatur um 30 K und die Lufttemperatur vor der Fassade, auf der sonnenzugewandten Seite um fast 0,5 K reduziert werden.

Die Einwirkung Starkregen wird durch die Ausführung des Dachs und der Außenanlagen beeinflusst. Die Konstruktionen der Außenwand und der Fassade sind nur für Schlagregen von Bedeutung und sind bereits umfangreich normativ geregelt. Durch die Verwendung eines begrünten Flachdachs kann im Vergleich zu einer freiliegenden Abdichtungsbahn der Regenwasserabfluss bei der Bemessungsregenspende um bis zu 50 % verringert werden. Wird durch ein Retentionsdach zusätzliches Rückhaltevolumen geschaffen, reduziert sich der Regenwasserabfluss weiter. Das auf dem Dach gespeicherte Regenwasser kann zur Bewässerung oder als Nutzwasser im Gebäude verwendet werden. Dadurch werden die Entwässerungssysteme entlastet und der Frischwasserbedarf reduziert. Positiv an der Dachbegrünung ist zusätzlich die Möglichkeit zur Erschließung der Umweltpotentiale Biodiversität und Feinstaubbindung.

Bei der Gestaltung der Außenanlagen kann durch eine Geländemodellierung die Gefährdung des Gebäudes durch Überflutung verringert werden. Retentionsvolumen kann durch die temporäre Verwendung von Zufahrten oder Verkehrsflächen als Rückhalteraum, die Errichtung von Sickermulden oder ähnlichen Retentionsflächen auf dem Grundstück geschaffen werden. Bei schwächeren Ereignissen kann bereits durch die Entsiegelung der Grundstücksflächen der Oberflächenabfluss reduziert werden, wodurch das öffentliche Kanalsystem entlastet wird. Bei stärkeren Niederschlagsereignissen ist die Entsiegelung der Oberfläche jedoch von untergeordneter Bedeutung.

Die Einwirkung Hochwasser gefährdet hauptsächlich den Keller und die Außenwände. Dringt Wasser aufgrund mangelnden Hochwasserschutzes in das Gebäude ein, kann es auch zur Beschädigung der Fußbodenaufbauten kommen. Im Hinblick auf die Anpassung an Hochwasser und der Erschließung positiver Klima- und Umweltpotentiale werden zwei verschiedene Ansätze verfolgt. Einerseits ist es möglich, die Widerstandsfähigkeit des Bauteilaufbaus durch die Wahl von wasserfesten Materialien und geklebten Verbindungen zu erhöhen.

Dies beeinflusst die Rückbaubarkeit negativ und bringt höhere Umweltwirkungen mit sich. Andererseits können leicht rückbaubare Konstruktionen eventuell mit Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen verwendet werden. Im Hochwasserfall muss der Bauteilaufbau beim ersten Ansatz nicht erneuert werden. Der zweite Ansatz hingegen ist vulnerabler gegenüber der Einwirkung Hochwasser, kann jedoch im Schadensfall mit geringem Aufwand erneuert oder bereits im Vorfeld durch Demontage der Schädigung entzogen werden. Ebenso werden Materialien verwendet, die im Vergleich zur wasserfesten Strategie geringere Umweltwirkungen haben. Je häufiger ein Schadensereignis im Lebenszyklus des Gebäudes auftritt, umso vorteilhafter wird die Ökobilanz des widerstandsfähigen Bauteilaufbaus im Vergleich zum vulnerablen Aufbau.

Auf die Einwirkung Hagel kann ebenso mit zwei grundsätzlich unterschiedlichen Strategien reagiert werden. Entweder wird für die äußerste Bauteilschicht ein Material mit hohem Hagelwiderstand gewählt oder die vulnerable Schicht wird durch die Anordnung einer Schutzlage der Einwirkung vollständig entzogen. Anhand des Dachaufbaus werden die Strategien erläutert. Bei einer freiliegenden Dachabdichtungsbahn kann ein Produkt mit hoher Hagelwiderstandsklasse gewählt werden. Ebenso ist es möglich, die Abdichtungsbahn der Einwirkung durch das Aufbringen einer Kiesschicht oder einer Dachbegrünung zu entziehen. Beide Strategien lassen sich ebenso auf Raffstore, Lichtkuppeln und Fassaden anwenden.

Die auf das Gebäude und Dachaufbauten wirkenden Lasten infolge der Einwirkung Wind lassen sich unabhängig von ihrer absoluten Größe allein durch die Wahl aerodynamisch vorteilhafter Geometrien reduzieren. Durch die Ausbildung einer Attika können im Vergleich zu einem attikalosen Aufbau die randnahen Soglasten um ca. 20 % verringert werden. Wird anstelle einer rechteckigen eine abgerundete Attika vorgesehen, reduzieren sich die Soglasten auf den weiter innen liegenden Dachflächen sogar um mehr als 70 % und die notwendigen Auflasten zur Lagesicherung von Dachaufbauten wie Photovoltaikmodule können wesentlich geringer ausgelegt werden. Eine geeignete Anordnung von PV-Modulen auf dem Dach kann die abhebenden Windkräfte ebenfalls abmildern.

Die Biodiversität wird durch eine geeignete Pflanzenauswahl bei der Begrünung von Außenanlagen, Dachflächen und Fassaden positiv beeinflusst. Um die Stabilität der natürlichen, einheimischen Ökosysteme zu unterstützen, sollte auf Zuchtarten, gebietsfremde, potentiell invasive und invasive Arten sowie Neophyten weitgehend verzichtet werden. Durch eine horizontale und vertikale Vernetzung bestehender und neu geschaffener Grünflächen können Lebensräume erweitert oder bisher isolierte Biotop miteinander verknüpft werden. Somit kann ein Netzwerk kommunizierender und sich gegenseitig stabilisierender Biotop geschaffen werden. Darüber hinaus kann durch die Auswahl geeigneter Pflanzen zusätzlich das Potential zur Feinstaubadsorption erhöht und somit die lokale Belastung der Luft reduziert werden. Des Weiteren ist eine vielfältige Gestaltung von Außenanlagen und Dachbegrünungen zu bevorzugen, um unterschiedlichen Lebewesen einen passenden Lebensraum zu bieten, Synergien zu schaffen und möglichst widerstandsfähige Ökosysteme zu erreichen. Die Auswahl geeigneter Arten wird durch ausführliche Pflanzenlisten unterstützt. Auf Grundlage einer intensiven wissenschaftlichen Literaturliteraturanalyse werden für jede geeignete Pflanzenart detaillierte Angaben bezüglich Gefährdung, ökologischer Zeigerwerte, Wuchshöhe sowie verschiedener biologischer Merkmale aufgeführt. Die entwickelten Listen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Die Begrünung von Außenanlagen, Dachflächen und Fassaden wirkt sich nicht nur positiv auf die Artenvielfalt und die Luftqualität aus, sondern beeinflusst auch das Mikroklima und damit die sommerliche Behaglichkeit im Außen- und Innenraum. Um die Auswirkungen detailliert zu untersuchen, werden Mikroklimasimulationen für die Musterliegenschaft und für zwei verschiedene Siedlungsräume, in die das Mustergebäude integriert wird, durchgeführt. Als typische Siedlungsräume wurden ein Dorfkern und eine Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung definiert. Es werden verschiedene Begrünungsszenarien entwickelt und deren Auswirkungen auf die Außenlufttemperatur und die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) analysiert.



Als Basis wird ein Zustand definiert bei dem die Außenanlagen ausschließlich aus Rasenflächen gebildet werden und bei dem keine Gebäudebegrünung ausgeführt ist. Durch die Pflanzung von Bäumen und Büschen und die Begrünung von Dächern und Fassaden können bei der Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung maximale Lufttemperaturreduktionen von mehr als 2 K erreicht werden. In den durch die Bäume verschatteten Bereichen kann die physiologisch äquivalente Temperatur um über 12 K verringert werden. Zudem werden die Auswirkungen von Wasserflächen und hellen Straßenbelägen analysiert.

Neben der Reduktion der Außenlufttemperatur führt eine Begrünung der Außenanlagen und der Bauteile zu einer Reduktion der Bauteiloberflächentemperaturen. Wie sich diese Effekte auf die thermische Behaglichkeit im Innenraum auswirken, wird durch die Koppelung einer thermisch-dynamischen Gebäudesimulation mit der Mikroklimasimulation für die Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung untersucht. Die Büsche und Bäume in den Außenanlagen als auch die Pflanzen der Gebäudebegrünung führen zu einer Verschattung der Bauteile. Des Weiteren wirken sich auch die Dämmwirkung des Substrats und der Pflanzen auf die Bauteiloberflächentemperaturen aus. Dies führt in Kombination mit der reduzierten Außenlufttemperatur gegenüber dem Ausgangszustand mit Rasen und bekiestem Flachdach zu einer Reduktion der Übertemperaturgradstunden im kritischen Innenraum von bis zu 20 %.

## 1.2. English Version

The impacts of anthropogenic climate change are already noticeable and will further increase until the end of the 21st century. Civil engineering has to progress dynamically with the foreseeable changes. The aim of climate adaptation is to make buildings suitable for expected future climate-related hazards and extreme events so that they also fulfil today's requirements over the foreseeable medium and long-term. This prevents or reduces damage to the building and ensures comfortable and healthy interior conditions. In contrast **Climate-adapted building** – as discussed in this project report – also takes into account the effects of the selected constructions on the local and global environment. At the component level, the climatic and environmental potentials considered include reducing global warming potential, saving grey energy and an optimized separation of components and materials during dismantling. At the property level, these are improvements to the micro-climate, rainwater retention, increasing biodiversity and reducing fine dust pollution.

The climate-adapted building measures are investigated on the basis of a prescribed sample building in Germany. The precise location of the sample building is not defined. It is a detached house with accompanying land. As this is a new building, the building constructions can be freely selected. Different options are shown for each component group, e.g. ceilings and walls.

As part of the project, the climate-related hazards such as summer heat, torrential rain, flood, hail and storm, are investigated. Based on an extensive literature analysis, the changes that are identified by evaluating observation data as well as those predicted by climate models are highlighted for each climate-related hazard. The change signals are clearest for the climatic impact of summer heat. Based on ex-post analyses, a clear increase in the number of hot days, the duration of hot periods, and summer temperatures can already be identified today. Depending on the underlying emission scenarios, further considerable increases will partially occur until the end of the 21st century. An intensification of the climate-related hazard torrential rain is also expected. Both the number and the intensity of torrential rain events will increase. Among other things, this results from an increased water absorption capacity of the atmosphere due to the rise in temperature. The observed climate data also indicates an increase in high water levels due to rain-induced river floods. No clear change signals are apparent from observation data and climate projections for the climatic impacts of hail and wind. This is in particular due to the fact that hail events are small-scale and wind gusts occur at very short notice and thus do not correspond to the geographical and temporal resolution of climate models. In principle, an increase in the exposure from north to south can be seen with regard to hail in Germany. Coastal areas are generally more affected by wind.

Based on the evaluation of the change signals, three exposure classes are defined for each climatic impact. Generally valid information about the future development of the climatic impacts can be provided by the exposure classes. At the same time, they serve as the assessment basis for the adjustment measures realized. As it is possible to adjust buildings to stronger hail events with relatively little effort, increased exposure classes are defined, compared to the current situation, despite the unclear change signals.

Based on the exposure classes, adjustment measures are shown for each climatic impact. Different region-typical and standard component structures are investigated here. The design of the outdoor facilities also plays an important role for the climate-related hazards of torrential rain and summer heat. The investigations of the climatic impact summer heat are largely based on thermal-dynamic building simulations according to DIN 4108-2:2013-02. As expected, the thermal comfort indoors improves in the summer with the increasing thermal storage mass of the various component structures. The appropriate glazing coatings, in order to improve the thermal protection in summer, should in principle be selected through a combination of daylight simulation and thermal-dynamic building simulation.

As a result of this planning process, the thermal comfort can be considerably increased in summer and at the same time good daylight quality can be ensured. The careful selection of variable external sun-shading systems in combination with the glazing is one of the main influencing factors on the summer thermal protection. Natural heat sinks to cool the interior should be envisaged. The cooler night-time outside air, the ground or groundwater can be considered here. In particular, if heating systems with ground heat pumps or groundwater heat pumps are planned, the relatively low additional investment costs should be spent on an additional heat exchanger for purely passive cooling. The use of reversible heat pumps for active cooling in very high summer temperatures, in combination with photovoltaic systems, is another possibility for a sustainable, future-proof concept.

The color selected for the component surfaces may also have a non-negligible impact on indoor temperatures in summer despite very good insulation properties. If light plastic waterproofing is used for insulated roof systems with exposed roof sealing sheets instead of conventional bitumen sealing sheets, the overheating degree hours indoors reduce by 10 % with solid construction and by 20 % in wooden buildings. If the waterproofing is covered by a light, 10 cm thick gravel layer, the overheating degree hours can be reduced by a further 55 %. The color chosen for the waterproofing also has an impact on micro-climate. By using light sealing sheets, the surface temperature can be reduced by 30 K and the air temperature in front of the façade on the sun-facing side can be reduced by almost 0.5 K.

The climatic impact torrential rain is influenced by the design of the roof and the external areas. The structures of the external wall and the façade are only important for driving rain and are already regulated extensively in the standards. By using a planted flat roof, the rainwater discharge can be reduced by up to 50 % for the design rainfall intensity compared to an exposed sealing sheet. If additional retention volume is created by a retention roof, the rainwater drainage decreases further. The rainwater stored on the roof can be used for irrigation or as non-potable water in the building. This relieves the drainage systems and fresh water demand. In addition, another positive aspect of roof planting is the possibility to enhance the environmental potentials of biodiversity and fine dust accumulation.

When designing the outdoor facilities, the threat of flooding to the building can be reduced by modelling the terrain. Retention volume can be created through the temporary use of accesses as retention areas, by establishing seepage basins or similar retention areas on the property. For weaker events, the surface drainage can be reduced by unsealing the surfaces of the property, which also relieves the public sewer system. For stronger precipitation events, however, unsealing is less important.

The climate-related hazard flood mainly threatens the cellar and external walls. However, if water penetrates the building due to a lack of flood protection, the floor construction can also be damaged. In respect of the adjustment to floods and the development of positive climate and environmental potentials, two different methods are applied. On one hand, it is possible to increase the resistance of the building structure by choosing waterproof materials and glued joints. This has a negative impact on the deconstruction and results in higher environmental impacts. On the other hand, easily dismantlable constructions, possibly with materials made from renewable resources, can be used. With the first approach, the building structure does not have to be replaced in the event of a flood. In contrast, the second approach is more vulnerable against the climate-related hazard of flood, but if damaged, they can be replaced at little cost or even removed in advance, if the pre-warning is sufficient. In addition materials which have lower environmental impacts compared to the waterproofing qualities can be used. The more frequently a damage event occurs during the life cycle of the building, the more advantageous is the Life Cycle Assessment of the resistant building structure compared to the more vulnerable design.

In principle, two different strategies can also be used to react on the climate-related hazard hail. Either a material with high hail-resistance is selected for the outer-most building layer, or the vulnerable layer is completely removed from exposure by introducing a protective layer. The strategies are explained using the roof structure. With an exposed roof sealing sheet, a product with a high hail resistance class can be selected. Similarly, it is possible to remove the sealing sheet from exposure to the impact by using a gravel layer or a greened roof. Both strategies can also be applied to Venetian blinds, skylights and façades. The loads impacting on the building and roof structures due to the hazard wind can be reduced by solely selecting aerodynamically advantageous geometries, irrespective of their absolute size. By building an attic, the suction loads close to the edge can be reduced by approx. 20 % compared to an attic-less structure. If a rounded attic is designed instead of a rectangular one, the suction loads on the roof surfaces further inside actually decrease by more than 50 % and the necessary loads for securing the position of the roof structures, such as photovoltaic modules, can be substantially lower. An appropriate arrangement of PV modules can also reduce the lifting wind forces.

The biodiversity is affected positively through an appropriate selection of plants for the outdoor facilities, roof surfaces and façades. In order to support the stability of the natural, native eco-systems, cultivation of farmed species, non-native, potentially invasive and invasive species and neophytes should largely be omitted. Through a horizontal and vertical networking of the existing and newly created green areas, habitats can be expanded and previously isolated biotopes can be connected. Consequently, a network of communicating and mutually stabilizing biotopes can be created. In addition, selecting appropriate plants can also increase the potential for fine dust adsorption and thus reduce the local air pollution. In addition, a diverse design of outdoor facilities and roof planting is preferred, in order to offer a suitable living area for various creatures, to create synergies and to achieve the most resistant eco-systems possible. The selection of appropriate species is supported by extensive plant lists. Based on an intensive academic analysis of the literature, detailed information is provided for each appropriate plant species with regard to endangerment, ecological indicative values, growing heights and various biological features. The developed lists are not definitive.

The greening of outdoor facilities, roof surfaces and façades not only has a positive effect on the variety of species and the air quality, but it also affects the micro-climate and thus the indoor and outdoor comfort during summer. In order to investigate the effects, micro-climate simulations are performed for the sample property and for two different settlement areas, in which the sample building is integrated. A village center and a residential estate with detached and multiple-dwelling houses are defined as typical settlement areas. Different planting scenarios are developed and their effects on the outdoor air temperature and the Physiologically Equivalent Temperature (PET) are analyzed. A scenario is defined as a basis, in which the outdoor areas are considered exclusively as lawn and in which there is no building greening. By planting trees and bushes and by greened roofs and façades, maximum air temperature reductions of more than 2 K can be achieved for the residential estate with detached and multiple-dwelling houses. In the areas shaded by the trees, the Physiologically Equivalent Temperature can be reduced by more than 12 K. In addition, the effects of water bodies and light colored road surfaces are analyzed.

Apart from reducing the external air temperature, the greening of the grounds with hedges and trees, as well as the greening of the roof and the façades lead to a reduction in building surface temperatures. The effect on the indoor thermal comfort is investigated by coupling the thermal-dynamic building simulations with the micro-climate simulations for the residential estate with detached and multiple-dwelling houses. The hedges and trees in the external property as well as the greening on the building lead to shading of the exposed building surfaces. Additionally, the insulating effect of the substrate and of the plants also has an impact on the surface temperatures. In combination with the reduced outdoor air temperatures compared to the initial scenario with lawn and gravel-covered roof surface, this leads to a reduction in the overheating degree hours in the critical indoor space of up to 20 %.

## 2. Einführung

### 2.1. Motivation

Die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels sind schon heute spürbar und werden sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts noch wesentlich verstärken. Das sich verändernde Klima führt dazu, dass sich die Wahrscheinlichkeit für Extremwetterereignisse bereits erhöht hat und noch weiter erhöhen wird (vgl. (Hassol et al. 2016: 3)). Die Intensität der Einwirkungen Hitze, Starkregen, Hochwasser, Hagel und Sturm unterliegen infolge des Klimawandels einer zeitlichen Veränderung. Dies ist für das Bauwesen von großer Bedeutung. Infolge der langen Standzeiten und Modernisierungszyklen, wirken sich aktuelle Planungsentscheidungen bei Neubauten bis weit in die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts aus. Dadurch wird heute entschieden, wie widerstandsfähig und klimaangepasst Gebäude zukünftig sein werden.

Das klimaangepasste Bauen sieht nicht nur eine Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der Gebäude gegenüber den Klimaeinwirkungen vor, sondern die gewählten Konstruktionen sollen einen Mehrwert für die Umgebung des klimaangepassten Gebäudes bewirken. Es handelt sich um keine reine Reaktion auf den Klimawandel, sondern um eine zusätzliche aktive Beeinflussung der direkten Umwelt des Gebäudes. Die getroffenen Maßnahmen erhöhen die Resilienz gegenüber einer Klimaeinwirkung (Hitze, Starkregen, Hochwasser, Hagel, Sturm) und wirken sich positiv auf andere Klimaeinwirkungen aus (Klimapotential) oder beeinflussen die Umwelt des Gebäudes in positiver Weise, z.B. durch eine Erhöhung der Biodiversität, durch Feinstaubbindung, Verbesserung des Mikroklimas, etc. (Umweltpotentiale). Das klimaangepasste Bauen zeichnet sich folglich durch eine erhöhte Resilienz bei gleichzeitiger Aktivierung von Klima- und Umweltpotentialen aus.

### 2.2. Aufgabenstellung

Die vorliegende Studie befasst sich mit einer fiktiven Musterliegenschaft, an der das klimaangepasste Bauen exemplarisch aufgezeigt und analysiert wird. Es handelt sich um ein Mustergebäude samt zugehörigem Mustergrundstück. Dies ist von wesentlicher Bedeutung, da die Sensitivität eines Gebäudes gegenüber einigen Klimaeinwirkungen durch die Umgebung aktiv beeinflusst werden kann. Dies gilt insbesondere für die Einwirkungen starkregeninduziertes Hochwasser und Hitze. In beiden Fällen kann eine Entsiegelung des Grundstücks zu einer Reduktion der Sensitivität führen, da Regenwasser versickern kann oder der Wärmeinseleffekt reduziert wird. Das bedeutet, dass der Betrachtungshorizont auf die unmittelbare und direkt beeinflussbare Umgebung des Gebäudes erweitert wird.

Bei dem Mustergebäude handelt es sich um einen Neubau. Lediglich die Geometrie bzw. Kubatur des Mustergebäudes sind festgelegt. Es wird dementsprechend kein Bestandsgebäude mit existierenden Bauteilaufbauten und Schichtenfolgen betrachtet, die es zu ertüchtigen gilt, sondern ein Neubau, bei dem der Entwurf im Sinne des klimaangepassten Bauens variiert wird. Dementsprechend wird auch davon ausgegangen, dass die Tragwerksplanung und die Haustechnik an die unterschiedlichen entstehenden Lösungen angepasst werden können. Für die Musterliegenschaft ist kein exakter Standort definiert. Es ist lediglich festgelegt, dass sie sich innerhalb Deutschlands befindet. Die im Folgenden definierten Expositionsklassen und durchgeführten Untersuchungen sind dementsprechend nur für das deutsche Bundesgebiet gültig.

Infolge des anthropogenen Klimawandels sind die Klimaeinwirkungen und damit die Exposition einer Liegenschaft keine statischen Kenngrößen, sondern unterliegen einer zeitlichen Veränderung. Die reine Klimaanpassung sieht vor, ein Gebäude so zu entwerfen und zu dimensionieren, dass es auch den zukünftigen Klimaeinwirkungen widerstehen kann. Dabei wird das Gebäude ausschließlich als passive Struktur gesehen, die die Einwirkungen erträgt.

Demgegenüber zeichnet sich das klimaangepasste Bauen dadurch aus, dass die Liegenschaft nicht nur auf Widerstandsfähigkeit dimensioniert wird, sondern gleichzeitig Klima- und Umweltpotentiale wie z.B. Reduktion des Treibhauspotentials, die Einsparung von Grauer Energie, die Rückbaubarkeit, die Regenwasserrückhaltung, die Verbesserung des Mikroklimas, die Erhöhung der Biodiversität und die Feinstaubbindung erschlossen werden.

Für jede Einwirkung sollen drei Belastungsfälle definiert werden, die die Bandbreite gering, mittel und hoch abdecken. Die Belastungsfälle beinhalten schon mögliche erwartete Änderungen aus dem Klimawandel. Beispielhaft werden für die Einwirkung Hagel die Expositionsklassen mit 2 cm Hagelkorndurchmesser für die niedrige Einwirkung, 4 cm Hagelkorndurchmesser für die mittlere Einwirkung und ein Hagelkorndurchmesser von 5 cm für die höchste Einwirkung festgelegt. Die Werte der Expositionsklassen liegen damit teilweise bereits über den bisherigen in den aktuellen Normen vorgegeben Werten, die die Klimaänderung noch nicht berücksichtigen.

Die Zielgruppe für das Forschungsvorhaben sind Planungsentscheider. Bei der Betrachtung der Konstruktionen werden nicht nur Konstruktionen mit maximaler Resilienz aufgezeigt sondern auch die Beeinflussung von Umwelt- und Klimapotentialen herausgearbeitet. Dies bedeutet, dass eine Bandbreite an Lösungen entwickelt werden soll, die von einer hohen Resilienz gegenüber den Klimaeinwirkungen aber keiner Beeinflussung von Umweltpotentialen bis hin zu einer hohen Resilienz und der gleichzeitigen Erschließung mehrerer Umweltpotentiale reicht.

### 2.3. Abgrenzung

Das Projekt „KLIBAU – Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens“ weist zahlreiche Schnittstellen zu Fragestellungen der Quartiers-/Stadtplanung und Nachhaltigkeit auf, die im Rahmen des Projekts jedoch nicht betrachtet werden können. Beispielsweise wird die Sensitivität eines Gebäudes nicht nur durch das eigene Grundstück, sondern auch durch die Gestaltung der benachbarten Grundstücke und öffentlichen Flächen (Straßenraum, Plätze, Parks,...) beeinflusst. Diese Wechselwirkungen, die über den eigenen Einflussbereich hinausgehen, werden in den folgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt.

Eine mögliche Methodik, um klimaangepasste Bauweisen zu erreichen, wäre die Analyse typischer Bauweisen in anderen Regionen der Welt, in denen heute oder früher dieselben Klimarandbedingungen herrschten wie zukünftig in Deutschland. Dabei besteht die Problematik, dass sich das Klima auch in anderen Regionen in den letzten Jahrzehnten bereits merklich gewandelt hat. Somit ist die historische Bausubstanz nicht an das aktuell herrschende Klima angepasst, sondern an einen historischen Klimazustand. Zudem können auch die aktuellen Bauweisen infolge des relativ schnellen Klimawandels nicht als komplett angepasst gelten. Eine entsprechende Analyse dieser Zusammenhänge stellt ein eigenes Forschungsfeld dar und ist deshalb nicht Teil des Betrachtungsumfangs.

Entsprechend der Leistungsbeschreibung zum Forschungsprojekt „Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens“ ist die Betrachtung der Einflussmöglichkeiten durch die Liegenschaft auf Feinstaub Teil der Aufgabenstellung, während die Einflussmöglichkeiten auf die Stickoxidbelastung (NO<sub>x</sub>) nicht Teil der Betrachtung sind. Hier besteht weitergehender Forschungsbedarf.

Das klimaangepasste Bauen und die aktuellen Bemühungen des Bundes zum preiswerten bzw. kostengünstigen Bauen können teilweise zu widerstrebenden Lösungen führen. Hierauf wird im Rahmen des Forschungsprojektes reagiert, indem unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt werden, die von einer Verbesserung der Resilienz mit geringem Aufwand und mindestens einem positiven Umwelt- und Klimapotential bis hin zu maximaler Resilienz mit zahlreichen Klima- und Umweltpotentialen reichen.

Die Lösungen werden mit einem materiellen und finanziellen Aufwand hinterlegt. Allerdings steht eine Entwicklung explizit kostengünstiger Lösungen nicht im Vordergrund. Bereits nach einem Klimaereignis, das im klimaangepassten Zustand zu einem Schaden geführt hätte, können sich anfänglich erhöhte Investitionskosten amortisiert haben. In Abhängigkeit der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadensereignisses kann finanzmathematisch bestimmt werden, bis zu welcher Investitionssumme sich schadensvermeidende Maßnahmen statistisch amortisieren. Detaillierte statistische und finanzmathematische Untersuchungen sind jedoch nicht Teil der Aufgabenstellung.

Das Projekt KLIBAU verfügt über zahlreiche Schnittstellen zum gesamten Themenkomplex Nachhaltigkeit im Bauwesen. Deren vollumfängliche Berücksichtigung und Optimierung würde den Rahmen der Aufgabenstellung sprengen. Selbstverständlich wäre es problematisch, Konstruktionen oder Maßnahmen für das klimaangepasste Bauen zu empfehlen, die zwar eine hohe Resilienz sowie positive Klima- und Umweltpotentiale aufweisen, gleichzeitig aber andere Kriterien des nachhaltigen Bauens in negativer Weise beeinflussen. Die klimaangepassten Bauweisen wirken sich auf die Ökobilanz insbesondere während der Herstellung, Erneuerung und dem Rückbau eines Gebäudes aus. Besonders widersprüchlich wäre die Empfehlung von konstruktiven Bauteilaufbauten, die ökobilanziell ein hohes Treibhauspotential verursachen. Bei Dimensionierung auf maximale Resilienz kann der Ressourcenverbrauch stark ansteigen. Die detaillierte Ausbildung und Schichtenfolge der Konstruktionen wirkt sich auf die Trennbarkeit von Materialschichten und somit auf deren Rückbaubarkeit und Verwertung aus.

Im Rahmen des Projektberichts wird punktuell auf diese Themen eingegangen und hingewiesen. Eine vollumfängliche Bearbeitung sowie ein iterativer, integraler Planungsprozess zur Optimierung hinsichtlich aller Fragen der Nachhaltigkeit können im Rahmen des Forschungsprojektes nicht stattfinden. Soll die Gesamtheit der sich gegenseitig beeinflussenden Themengebiete betrachtet werden, so erfordert dies detaillierte Untersuchungen und einen integralen Planungsprozess im Einzelfall oder ein Folgeprojekt, in dem Bauteilkataloge erstellt werden, die anschließend bezüglich festgelegter Nachhaltigkeitskriterien bewertet werden.

## 2.4. Begriffsdefinitionen

Für das Verständnis des Projektberichts sind die folgenden Begriffsdefinitionen von Bedeutung.

**Klimaeinwirkung:** Das Klima ist definiert als die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort charakterisieren. Dementsprechend sind Klimaeinwirkungen Wetterelemente, die sich auf ein Gebäude auswirken können, wie Niederschlag, Wind, Lufttemperatur. Infolgedessen werden die damit verbundenen Ereignisse Starkregen, Hochwasser, Hagel, Hitze und Trockenheit im Folgenden als Klimaeinwirkungen bezeichnet.

**Umwelteinwirkung:** Parameter die das Gebäude und seine Umgebung beeinflussen aber nicht ausschließlich oder unmittelbar vom Klima abhängen: Biodiversität, Feinstaub, Lärm.

**Klimapotential:** Die Möglichkeit das Klima oder die Klimaeinwirkungen positiv zu beeinflussen.

**Umweltpotential:** Die Möglichkeit die Umwelteinwirkungen positiv zu beeinflussen.

**Resilienz:** Der Begriff Resilienz wurde durch Holling (1973: 17) in den 1970er Jahren geprägt und entstammt ursprünglich der Ökosystemforschung. Im Laufe der 1990er Jahre fand der Begriff Eingang in die Nachhaltigkeitsforschung (Brand/Hoheisel/Kirchhoff 2011: 78). Der Weltklimarat (engl.: International Panel on Climate Change (IPCC)) definiert Resilienz als die Fähigkeit eines sozialen, ökonomischen oder ökologischen Systems auf ein gefährliches Ereignis, einen gefährlichen Trend oder eine gefährliche Störung zu reagieren oder sich umzuorganisieren, sodass die wesentlichen Funktionen und Struktur des Systems aufrechterhalten bleiben und gleichzeitig die Fähigkeit zur Anpassung, Weiterentwicklung und Umwandlung erhalten bleiben (IPCC 2014b: 5). Im Zusammenhang mit dem Klimaangepassten Bauen ist unter Resilienz die Widerstandsfähigkeit der Liegenschaft gegenüber den Klima- und Umwelteinwirkungen zu verstehen bzw. die Möglichkeit, die Liegenschaft ohne großen Aufwand an sich verändernde Klima- und Umwelteinwirkungen anzupassen.

**Vulnerabilität:** Der Begriff Vulnerabilität entstammt der geographischen Entwicklungsforschung, Entwicklungszusammenarbeit bzw. Entwicklungspolitik (Chambers 1989: 1) und der Forschung zu Naturgefahren. Der IPCC definiert Vulnerabilität als die Neigung oder Veranlagung eines Systems nachteilig beeinflusst zu werden. Vulnerabilität umfasst ein breites Spektrum von Konzepten und Elementen darunter Sensitivität, Schadensanfälligkeit, fehlende Kapazität zum Widerstand und zur Anpassung (IPCC 2014b: 5). Im Kontext des Klimaangepassten Bauens ist unter Vulnerabilität die Verwundbarkeit bzw. Verletzbarkeit der Liegenschaft gegenüber den Folgen einer Klima- oder Umwelteinwirkung zu verstehen.

**Graue Energie:** Die Graue Energie berechnet sich aus der Summe aller nicht-erneuerbaren Primärenergieträger und energetisch nutzbaren fossilen Rohstoffe sowie der Wasserkraft eines bestimmten Systems. Das System umfasst in der Regel alle wichtigen Prozesse, vom Rohstoffabbau beginnend bis zum Ort der Bereitstellung des Produkts oder der Leistung. Entscheidend für die Aussagekraft der Grauen Energie sind einerseits die Art der Bewertung der Energieträger und andererseits die Grenzen des betrachteten Systems (vgl. BMI 2018b).

**Graue Emissionen:** Die Grauen Emissionen sind alle bei der Bereitstellung der Grauen Energie anfallenden Treibhausgasemissionen. Diese werden beispielsweise bei der Verbrennung von Energieträgern frei.



### 3. Musterliegenschaft

Bei der ausgewählten Musterliegenschaft handelt es sich um ein freistehendes Einfamilienhaus. Der Standort der Musterliegenschaft ist abhängig von der definierten Einwirkung, da es schwierig erscheint, einen festgelegten Standort für alle Einwirkungsklassen zu finden. Die nachfolgenden Ansichten in der Abbildung 1 und die Grundrisse in der Abbildung 2 bis Abbildung 4 geben einen Überblick über die geplante Ausführung des Gebäudes. In der Abbildung 5 ist ein Schnitt mit den Standard-Bauteilaufbauten dargestellt. Um das Gebäude auf einen möglichen Hochwasserschaden oder Wassereintritt zu untersuchen, wurde dem nördlichen Teil der Musterliegenschaft ein Kellergeschoss hinzugefügt (s. Abbildung 2).

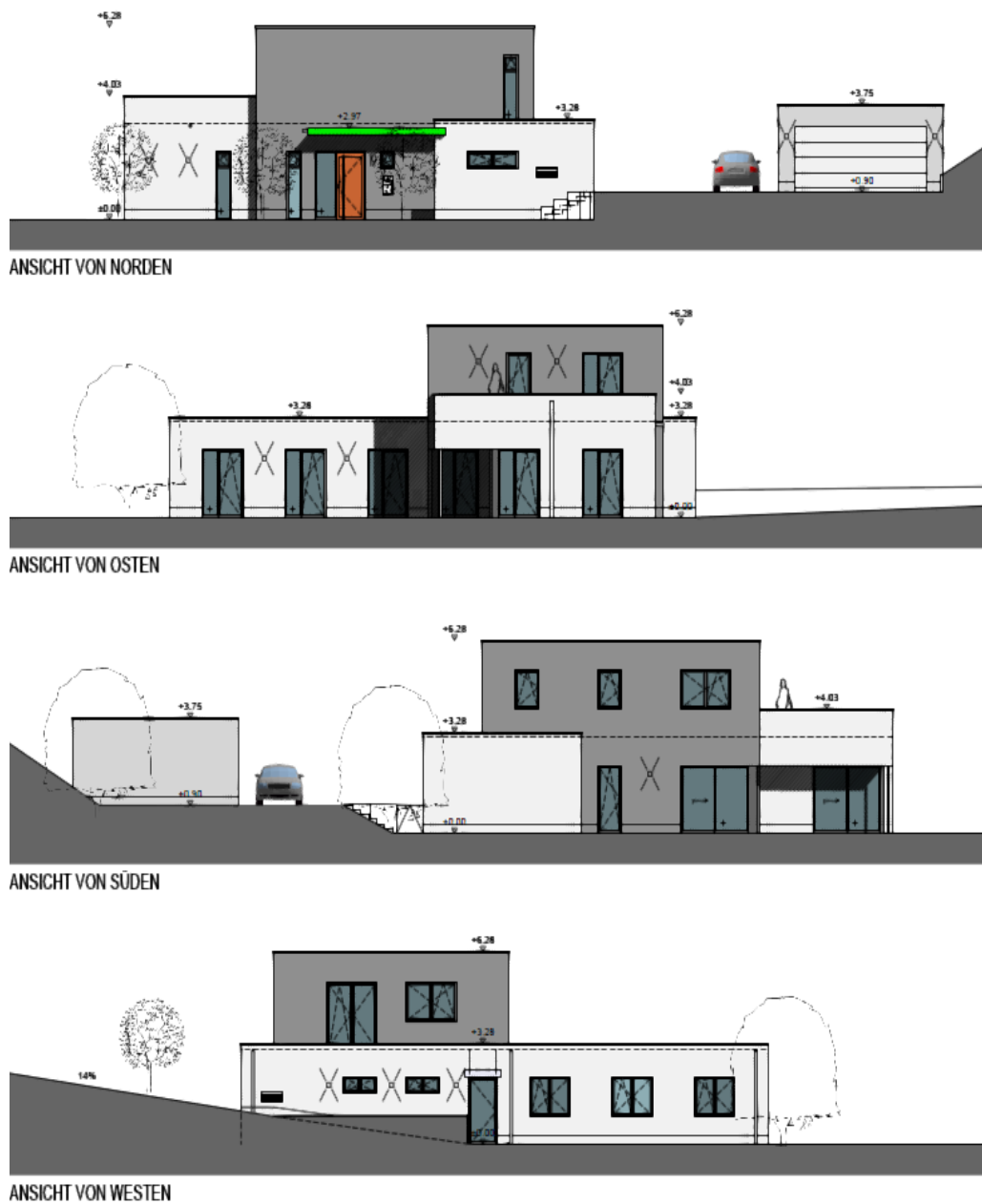


Abbildung 1: Ansichten der Musterliegenschaft

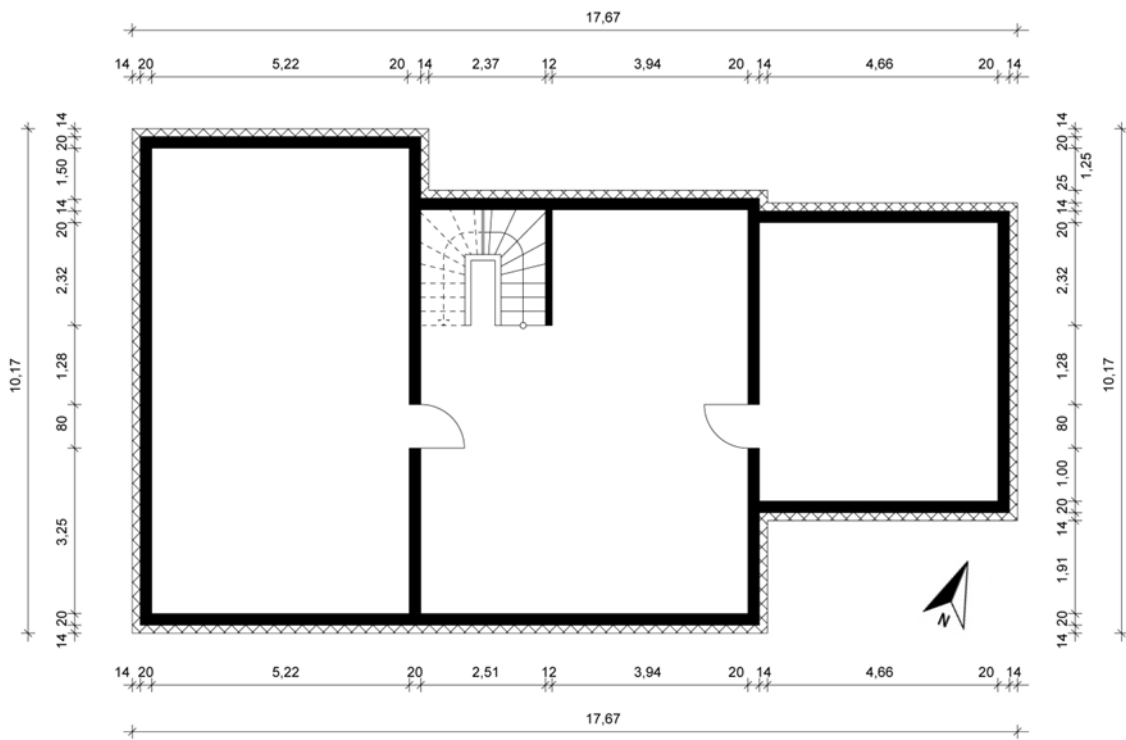


Abbildung 2: Grundriss UG der Musterliegenschaft

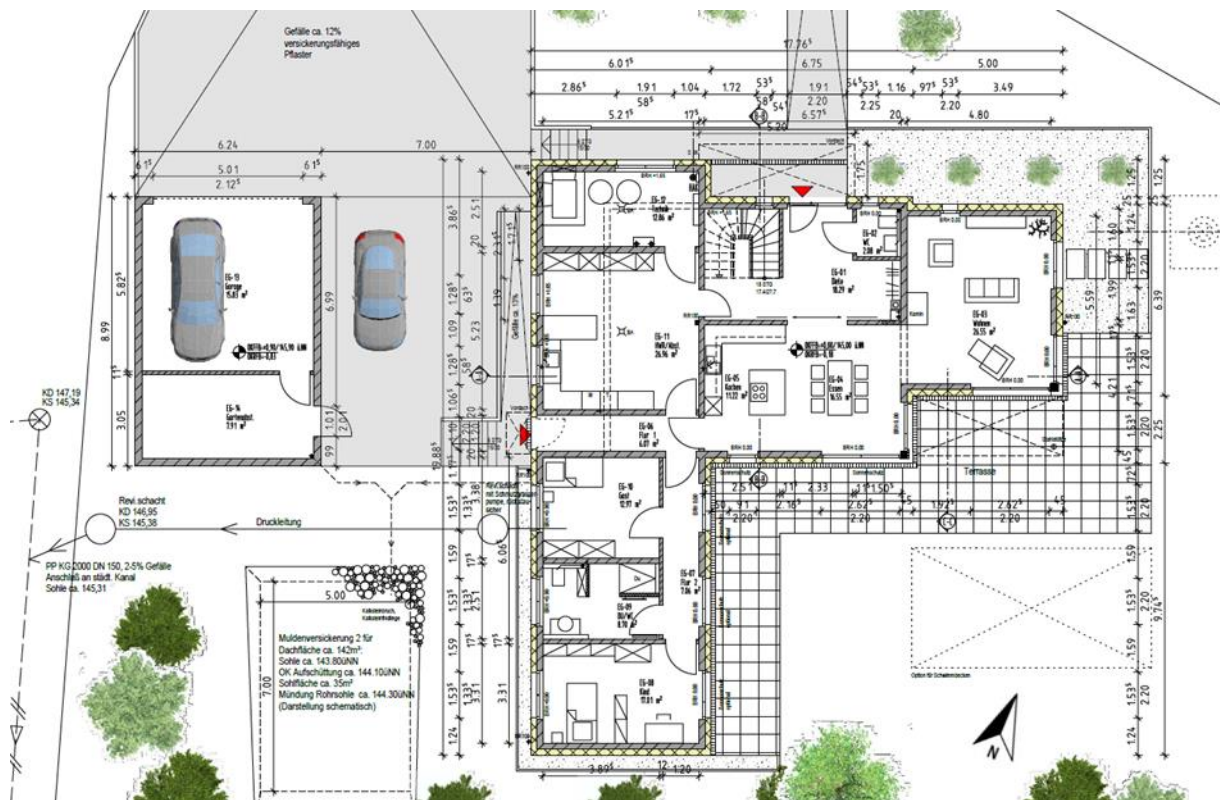


Abbildung 3: Grundriss EG der Musterliegenschaft

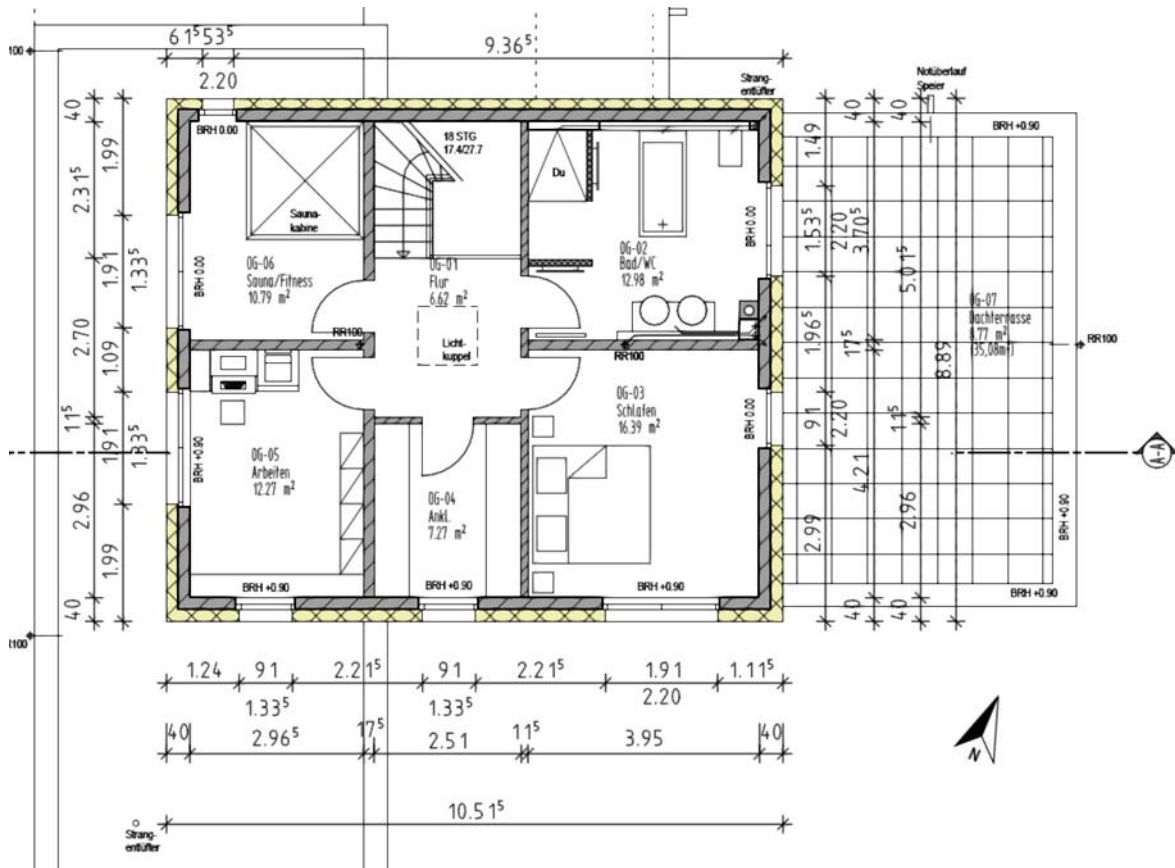
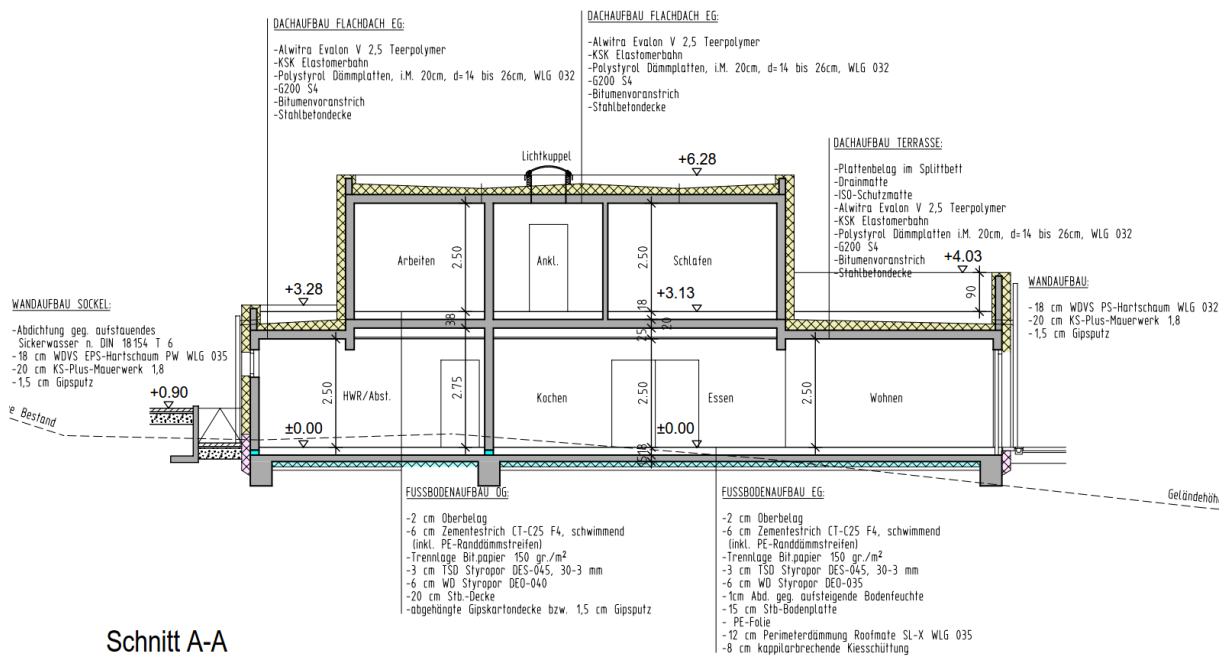


Abbildung 4: Grundriss 1. OG der Musterliegenschaft



Schnitt A-A

Abbildung 5: Schnitt A-A der Musterliegenschaft mit den Standard-Bauteilaufbauten

## 4. Untersuchte Klima- und Umweltpotentiale

Die Musterliegenschaft wird auf verschiedene Klima- und Umweltpotentiale untersucht, auf die im Folgenden detaillierter eingegangen wird. Über die Klima- und Umweltpotentiale lässt sich die Auswirkung der entwickelten Bauteilvarianten miteinander vergleichen. Neben den in diesem Kapitel vorgestellten Klima- und Umweltpotentialen existieren zusätzliche Potentiale, die im Rahmen des Forschungsprojekts jedoch nicht näher betrachtet werden.

### 4.1. Lebenszyklusanalyse

Die Erfassung von Umweltwirkungen eines Produkts oder einer Dienstleistung erfolgt über eine Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment, kurz: LCA), die auch als Ökobilanz bezeichnet wird. Eine Lebenszyklusanalyse wird in folgende Abschnitte unterteilt:

1. Festlegung des Ziel- und Untersuchungsrahmens,
2. Sachbilanz,
3. Wirkungsabschätzung,
4. Auswertung.

#### 4.1.1. Festlegung des Ziel- und Untersuchungsrahmens

Bei der Festlegung des Ziel- und Untersuchungsrahmens wird auf folgende Punkte eingegangen:

- Systemgrenzen,
- Einschränkungen,
- Funktionelle Einheit,
- Bilanzierungszeitraum,
- (Lebensdauer).

In einer Ökobilanz werden einem Produktsystem sowohl die benötigten Ressourcen und der Energiebedarf zur Herstellung (Inputstrom) als auch die daraus folgenden Abfall- und Emissionsmengen (Outputstrom), die in den Phasen seines Lebensweges anfallen, zugeordnet (DIN EN ISO 14044:2018-05: 10). Jede Phase wird wiederum in einzelne Module unterteilt. Die einzelnen Phasen des Lebensweges sind (DIN EN 15978:2012-10: 21):

- Herstellungsphase (Module A1 - A3),
- Errichtungsphase (Module A4 - A5),
- Nutzungsphase (Module B1 - B7),
- Entsorgungsphase (Module C1 - C4),
- Wiederverwendung, Rückgewinnung, Recycling (Modul D).

In den Modulen werden die einzelnen Schritte der Lebenswegphasen weiter spezifiziert. Beispielsweise behandeln die Module der Herstellungsphase folgende Aspekte:

- A1: Rohstoffbeschaffung,
- A2: Transport,
- A3: Produktion.

Im Rahmen dieses Endberichts werden die Bilanzen für die Phasen A-C erstellt. Da für manche verwendeten Materialien jedoch keine Daten für die Phasen B und C zur Verfügung stehen, wird zum Vergleich die Module A1 bis A3 betrachtet. Als funktionelle Einheit wird 1 m<sup>2</sup> Bauteilaufbau gewählt. Der Bilanzierungszeitraum beträgt 50 Jahre.

#### 4.1.2. Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

Der Abschnitt Sachbilanz und Wirkungsabschätzung unterteilt sich in die Bereiche

- Umweltwirkungen,
- Wirkungskategorien und
- Datengrundlage.

Der Einfluss der Stoffströme wird auf Basis von Wirkungskategorien abgeschätzt. Im Bauwesen geläufige Wirkungskategorien mit ihren Einheiten und den abgeleiteten Umweltwirkungen sind in der Tabelle 1 dargestellt. Die Einheiten einiger Umweltwirkungen sind als Äquivalent angegeben. Dadurch wird ausgedrückt, dass mehrere Ströme derselben Wirkungskategorie zugeordnet werden können. Beispielsweise führt sowohl die Emission von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) als auch von Methan (CH<sub>4</sub>) zu einer Verstärkung des Treibhauseffekts. Da allerdings die Wirkung von Methan ungefähr 25-mal so hoch ist wie die von Kohlendioxid, müssen die verschiedenen Emissionen normiert werden. Die Normierung erfolgt über die Umrechnung in ein Äquivalent. Wird 1 kg CH<sub>4</sub> emittiert, entspricht dies 25 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent (UBA 7. 06. 2019).

Tabelle 1: Im Bauwesen geläufige Wirkungskategorien und Umweltwirkungen

Wirkungskategorie	Abkürzung	Einheit	Umweltwirkung
Treibhauspotential (über 100 Jahre)	GWP <sub>100</sub>	kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent	Klimaerwärmung
Ozonabbaupotential	ODP	kg CFC-11-Äquivalent	Abbau der Ozonschicht
Photochemisches Ozonbildungspotential	PoCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquivalent	Sommersmog
Versauerungspotential	AP	Kg SO <sub>2</sub> -Äquivalent	Versauerung
Eutrophierungspotential	EP	Kg PO <sub>3,4</sub> -Äquivalent	Überdüngung
Primärenergiegehalt nicht erneuerbar	PENRT	MJ	Fossiler Energieverbrauch
Primärenergiegehalt erneuerbar	PERT	MJ	Erneuerbarer Energieverbrauch

Im Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) und im Zertifizierungssystem der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) werden alle aufgeführten Wirkungskategorien betrachtet. Allerdings werden die Wirkungskategorien GWP<sub>100</sub> und PENRT stärker gewichtet und dienen als Leitindikatoren (Badr et al. 2018: 92). Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die Kategorie GWP<sub>100</sub> im Rahmen des Forschungsprojekts als GWP bezeichnet. Ebenso werden nur die Kategorien GWP und PENRT analysiert. Sowohl das Treibhauspotential als auch der nicht erneuerbare Primärenergiegehalt sind Wirkungskategorien, die den Klimawandel direkt beeinflussen oder sogar noch weiter verstärken. Werden zusätzlich die weiteren Wirkungskategorien untersucht, wird die Analyse schnell unübersichtlich ohne dass ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn im Hinblick auf das Ziel dieser Arbeit entsteht. Die funktionale Einheit der einzelnen Schichtaufbauten für die Bauteilvarianten ist jeweils 1 m<sup>2</sup> Bauteilfläche. Die Betrachtung erfolgt nur für den regulären Bauteilaufbau. Verbindungen wie beispielsweise zu Fenstern oder Türöffnungen werden nicht bilanziert. Die Ökobilanzierung erfolgt mit dem Onlinetool eLCA des BBSR, in dem die Ökobilanzwerte aus der ÖKOBAUDAT hinterlegt sind.

Im Allgemeinen wird eine Bilanzierung der Lebenszyklusphasen A bis C angestrebt. Allerdings liegen nicht für jeden Datenbankeintrag ausreichende Angaben vor. Findet eine abweichende Bilanzierung statt, wird dies gesondert vermerkt. Zusätzlich werden für jede Bauteilgruppe die Ökobilanzwerte der Module A1 bis A3 aufgezeigt. Dadurch wird dargestellt, welchen Umwelteinfluss die Bauteile in der Herstellungsphase haben.

#### 4.2. Rückbaubarkeit und Rezyklierbarkeit

Die Rückbaubarkeit von Bauteilen ist ein wichtiger Schritt zur Minderung des Ressourcenverbrauchs und der Grauen Energie. Je sortenreiner ein Bauteil wieder getrennt werden kann, umso höher ist die Möglichkeit, den einzelnen Baustoff wieder- oder weiter zu verwerten. Den Umgang mit Abfällen regelt das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), das dem Grundsatz „Vermeiden vor Verwerten vor Beseitigen“ folgt. Die sich hieraus ergebende Hierarchie hat fünf Stufen (BRD 2017: 10):

1. Vermeidung,
2. Vorbereitung zur Wiederverwertung,
3. Recycling,
4. Sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung,
5. Beseitigung.

Essentiell für die sortenreine Trennung ist die Verbindungsart der einzelnen Schichten. Unter Verwendung von lösbaren Verbindungen wie Schraub- oder Steckverbindungen können die Bauteile in Einzelteile zerlegt und sortenrein verwertet werden. Verklebte Verbindungen hingegen können nicht vollständig voneinander getrennt werden und führen zu einer in den meisten Fällen untrennbaren oder nur mit großem Aufwand lösbaren Verbindung der Bauteile. Im Zertifizierungssystem BNB wird die Rückbaubarkeit und die Verwertbarkeit der Baustoffe im Kriterium 4.1.4. bewertet. Das Kriterium betrachtet ein Bauteil auf drei Stufen: der Rückbaubarkeit des Bauteils, der sortenreinen Trennbarkeit der einzelnen Schichten und der Verwertung des Materials.

Die Rückbaubarkeit des Bauteils berücksichtigt den Aufwand, der benötigt wird, um das gesamte Bauteil von den umgebenden Bauteilen zu lösen. Die sortenreine Trennbarkeit der einzelnen Schichten berücksichtigt den Aufwand, der für eine sortenreine Trennung nötig ist, während die Verwertbarkeit der Bauteile den Aufwand und die Möglichkeit der Wiederverwertbarkeit des einzelnen Baustoffs betrachtet. Die einzelnen Schichten des Bauteils werden für die drei Aspekte auf einer Skala von 0 bis 100 bewertet, wobei 0 für „sehr ungünstig“ und 100 für „sehr günstig“ steht. Aus der Bewertung ergibt sich für jede Schicht der sogenannte Recyclingfaktor R. Der Recyclingfaktor berechnet sich nach (Gl. 1) zu:

$$R = 0,3 \cdot P_{\text{Rückbau}} + 0,3 \cdot P_{\text{Sortenreinheit}} + 0,4 \cdot P_{\text{Verwertung}} \quad (\text{Gl. 1})$$

$P_i$  steht dabei für die erreichten Punkte je Stufe. Für die Ermittlung des Gesamtergebnisses werden die einzelnen Recyclingfaktoren jeder Bauteilschicht mit dem Anteil der Masse an der Gesamtmasse des Gebäudes gewichtet und die Punkte addiert. Die Gesamtpunktzahl fließt direkt in das BNB-System ein (BMUB 2015: A2). Die Bewertung der Rückbau- und Trennbarkeit erfolgt rein qualitativ. Ein quantitatives System ist momentan noch in der Forschung (Hillebrandt et al. 2018: 30). Im Rahmen des Forschungsprojekts wird das BNB-Zertifizierungssystem modifiziert, da aufgrund mangelnder Informationen keine Bewertung einzelner Schichten bezogen auf die Gesamtmasse des Gebäudes erfolgen kann. Somit wird der Recyclingfaktor jeder Schicht ins Verhältnis gesetzt zur Gesamtmasse des untersuchten Bauteilaufbaus. Nachteilig daran ist jedoch, dass der tragenden Schicht aufgrund der großen Masse im Vergleich zu den leichten Dämmstoffen oder Abdichtungsbahnen eine hohe Gewichtung von teilweise deutlich über 90 % zugeteilt wird.

Um diese Unregelmäßigkeiten auszugleichen und eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen, wird bei einigen Bauteilgruppen die tragende Struktur nicht berücksichtigt. Entsprechende Erläuterungen zum Berechnungsverfahren werden an der jeweiligen Stelle gegeben. Eine absolute Vergleichbarkeit der einzelnen Bauteilgruppen untereinander ist aufgrund dieser Vorgehensweise allerdings nicht möglich.

#### 4.3. Regenwasserretention

Die Regenwasserrückhaltung nimmt in der Quartiersplanung eine immer wichtigere Rolle ein. Dabei wird zwischen einer zeitlich verzögerten Einleitung in die Kanalisation und einer dauerhaften Rückhaltung und Nutzung des anfallenden Regenwassers unterschieden. Eine einfache Möglichkeit der Abflussverzögerung ist die Entsiegelung oder Bepflanzung von Flächen (BBSR 2018a). Sickermulden stellen ebenso eine gute Möglichkeit der Abflussverzögerung dar. Das anfallende Wasser wird in künstlich angelegte Mulden mit einer Tiefe von ungefähr 30 cm eingeleitet, wo es sich sammelt und in das Erdreich versickert (BauNetz Media GmbH 23. 05. 2019). Auch extensive Gründächer tragen schon ohne zusätzliche Retentionsmaßnahmen zu einer Abflussverzögerung bei (Pfoser et al. 2013). Durch die Abflussverzögerung kann das Niederschlagswasser allerdings noch nicht genutzt werden. Zur Nutzung müssen ober- oder unterirdische Becken oder Tanks geschaffen werden, in denen das Wasser zwischengespeichert wird. Zur Rückhaltung und Nutzung des Regenwassers bietet sich in vielen Fällen die Kombination verschiedener Maßnahmen an. Für Grundstückseigentümer hat die Verwendung von unversiegelten Oberflächen sowie Versickerungsflächen finanzielle Vorteile. Nach einem Urteil des Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg in Mannheim vom 11.03.2010 ist die sogenannte „gesplittete Abwassergebühr“ bundesweit anzuwenden (VGH BW 2010). Bei der gesplitteten Abwassergebühr werden die Gebühren für Schmutzwasser, also „verbrauchtes“ Frischwasser und Niederschlagswasser getrennt. Die Kosten für die Entsorgung von Niederschlagswasser werden nur auf die tatsächlich ins Kanalnetz eingeleitete Menge angerechnet. Niederschlagswasser, das auf dem Grundstück versickert, wird in der Abwassergebühr nicht berücksichtigt. Neben den finanziellen Anreizen ist die gesplittete Abwassergebühr auch ein ökologisches Steuerelement, um Regenwasserrückhaltung zu fördern und im Starkregenfall Abflussspitzen zu dämpfen.

Der Umgang mit Niederschlag einer Liegenschaft muss stets in Verbindung mit umliegenden Gebäuden auf kommunaler Ebene betrachtet werden. Grundlegend ist hier das Prinzip der Schwammstadt, das vorsieht, anfallendes Niederschlagswasser eher zu speichern und zu nutzen, anstatt es oberflächlich abzuleiten. Das angefallene Regenwasser kann dann wie bei einem Schwamm von verschiedenen Bereichen der Stadt „aufgesogen“ und bei Bedarf zu vielfältigen Zwecken verwendet werden. Neben der Regenwasserrückhaltung und der Einsparung von Frischwasser bietet die Schwammstadt auch Vorteile im Hinblick auf die Verbesserung des Mikroklimas durch Verdunstung (BBSR 2018b). Genauere Ausführungen zur Gestaltung der Außenanlage finden sich in Kapitel 7.4.5.

#### 4.4. Verbesserung des Mikroklimas

Das Mikroklima, oder auch Kleinklima genannt, bezeichnet das Klima der bodennahen Luftschichten bis zu einer Höhe von ungefähr 2 m und wird hauptsächlich beeinflusst durch die Gestaltung der Oberfläche, der Bodeneigenschaften und der Bodenbedeckung (Hupfer/Kuttler/Heyer 2005: 315 f.). Einer der hauptsächlichsten Faktoren des Kleinklimas ist die Energiebilanz an der Grenzfläche zwischen Boden und Atmosphäre. Das Kleinklima stellt eine lokal begrenzte Änderung des übergeordneten Großklimas dar. In urbanen Gebieten hat die Oberflächengestaltung der Bebauung einen großen Einfluss auf das Mikroklima. Dabei ist die Albedo von Bedeutung, die als Verhältnis zwischen reflektierter und insgesamt einfallender Sonnenenergie definiert ist (Schönwiese 2013). Eine Oberfläche, die 30 % der Gesamtstrahlung reflektiert, hat folglich eine Albedo von 0,3. Durch die niedrige Albedo vieler Oberflächen in besiedelten Gebieten heizen sich die Materialien auf und strahlen die Wärme in der Nacht wieder an die Umgebungsluft ab. Dadurch kommt es auch in der Nacht zu einer verminderten Abkühlung des Mikroklimas.

Dies beeinflusst zum einen die Behaglichkeit und den Aufenthaltskomfort der Menschen, trägt aber auch auf gesundheitlicher Ebene beispielsweise zu schlechtem Schlaf bei. Die Erwärmung des Mikroklimas führt im Sommer zu einer Erwärmung des Gebäudeinneren und damit zu einem erhöhten Kühlbedarf und einem in den meisten Fällen erhöhten fossilen Primärenergiegehalt für den Betrieb der Kühlsysteme. Das Mikroklima gliedert sich in den klimatologischen Bereich des Stadtklimas ein. Einer der zentralen Begriffe des Stadtklimas ist die städtische Übererwärmung, die auch als städtischer Wärmeinseleffekt bezeichnet wird (Hupfer/Kuttler/Heyer 2005: 389). Da die oben beschriebenen Effekte der Wärmespeicherung in Bauteilen fast überall in besiedelten Gebieten auftreten, kumulieren sich die einzelnen Mikroklimabereiche innerhalb eines Gebiets und führen zu einer flächendeckenden Erwärmung des Stadtgebiets.

Da sich die Untersuchung des Mikroklimas in dieser Arbeit auf der Bauteilebene bezieht, wird das Mikroklima nur im Hinblick auf die Temperatur analysiert. Aussagen zu mikroklimatischen Windströmungen und Lichtbedingungen können nur getroffen werden, wenn Informationen über die Umgebungsbebauung vorliegen. Ähnlich wie bei der Regenwasserrückhaltung werden beim Mikroklimas nur die oberirdische Gebäudehülle sowie die Außenanlagen betrachtet. Der Keller und der Fußbodenaufbau haben für das Mikroklima eine untergeordnete Bedeutung. Um den tatsächlichen Einfluss der einzelnen Varianten auf das Mikroklima zu quantifizieren, ist eine Mikroklimasimulation nötig. Da dies den Rahmen der Arbeit überschreiten würde, erfolgt die Bewertung des Einflusses auf das Mikroklima qualitativ.

#### **4.5. Erhöhung der Biodiversität**

Der globale Zustandsbericht zur Biodiversität und zu Ökosystemdienstleistungen des Weltbiodiversitätsrates aus dem Jahr 2019 verdeutlicht den teils dramatischen Zustand der Ökosysteme. Von den geschätzten 8 Millionen Tier- und Pflanzenarten sind ungefähr 1 Million vom Aussterben bedroht (Diaz et al. 2019: 12). Als Hauptursache für die Bedrohung der Artenvielfalt an Land wurde der Verlust von Lebensräumen identifiziert, der auf Landnutzungsänderungen zurückzuführen ist. Aber auch die Umweltverschmutzung, gebietsfremde invasive Tier- und Pflanzenarten und der Klimawandel bedrohen die Biodiversität. Aktuell werden über 40 % der weltweiten Landfläche für die Landwirtschaft oder für Siedlungen genutzt. Nur noch 23 % der Landfläche und 13 % der Ozeane werden als Wildnis eingestuft (Ichii et al. 2019: 5).

Knapp 70 % aller in Deutschland bekannten Tierarten sind Insekten. Das Bundesamt für Naturschutz weist darauf hin, dass die Gesamtzahl der Insekten und die Insektenvielfalt in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten abgenommen haben. Grundlage für diese Feststellung ist eine Analyse der Roten Listen gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. 45 % der in Deutschland untersuchten Insektenarten weisen einen langfristigen Abnahmetrend auf, während nur für 2 % eine langfristige Zunahme festgestellt werden konnte. Als wesentliche Ursachen für den Rückgang der Insekten werden der Verlust von Lebensräumen und die fehlende Vernetzung der verbleibenden Lebensräume identifiziert (Ries et al. 2019: 243).

Im Rahmen einer Studie zur Bestandsentwicklung von Fluginsekten in deutschen Schutzgebieten wurde festgestellt, dass die Biomasse der fliegenden Insekten zwischen 1989 und 2016 im Mittel um 76 % zurückgegangen ist (Hallmann et al. 2017: 10). Ungefähr 87,5 % der blühenden Wildpflanzen und mehr als 75 % der Nahrungspflanzen sind zumindest teilweise von der Bestäubung durch Tiere abhängig (Potts 2016: 16 f.) zudem sind 60 % aller Vögel auf Insekten als Nahrungsgrundlage angewiesen. Darüber hinaus sind Insekten auch bei zahlreichen Amphibien, Reptilien und Säugetieren wesentlicher Nahrungsbestandteil. Dies verdeutlicht die enorme Bedeutung von Insekten für die Funktionsfähigkeit der Landwirtschaft und ganzer Ökosysteme (Morse 1971: 177).



Ein einzelner Garten oder die Begrünung eines einzelnen Gebäudes sind von der Größe her nicht ausreichend, um einen funktionsfähigen Lebensraum zu bilden. Allerdings kann die Gebäudebegrünung oder die biologisch optimierte Gestaltung einzelner Gartenflächen zu einer Vergrößerung von existierenden, benachbarten Lebensräumen führen oder zu einer Vernetzung bestehender Lebensräume beitragen. Somit kann jeder Einzelne einen kleinen Beitrag leisten, um die Lebensbedingungen für Insekten und Kleintiere zu verbessern und dadurch wesentliche Lebensgrundlagen zu erhalten (s. Kapitel 8).

Neben der Begrünung von Flachdächern ist es ebenso möglich, Schrägdächer zu begrünen. Dabei sind aber aufgrund der begrenzten Tragfähigkeit des Dachaufbaus nur geringe Schichtenaufbauten von 5 – 10 cm möglich. Im Allgemeinen sind Begrünungen von Dachneigungen bis 30° zu empfehlen. Ist die Dachneigung zu groß, kann es unter anderem dazu führen, dass das Oberflächenwasser zu schnell abgeleitet wird und keine ausreichende Speichermöglichkeit besteht (Hestermann/Rongen 2018: 223).

#### 4.6. Feinstaubbindung

Luftschadstoffe führen zu erheblichen Belastungen der menschlichen Gesundheit. Unter den 10 größten Risikofaktoren für die Gesundheit in Deutschland befindet sich auch die Luftverschmutzung, allerdings auf einem der hinteren Plätze (IHME 2017; Plass et al. 2014: 635). In Ländern wie beispielsweise Indien oder China liegt die Krankheitslast durch Luftverschmutzung an dritter bzw. vierter Stelle (IHME 2017). Die Luftschadstoffbelastung setzt sich aus verschiedenen Partikeln und gasförmigen Verunreinigungen zusammen. Zur Abschätzung der Belastung werden insbesondere die Konzentrationen von Feinstaub, Stickoxiden sowie Ozon gemessen und analysiert. Feinstaubpartikel führen unter anderem zu Atemwegserkrankungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen (Atherosklerose) und können die Entwicklung des Fötus während der Schwangerschaft beeinträchtigen (Schulz et al. 2018: 64 ff.).

Insbesondere bei der Feinstaubbelastung ist in den letzten zwei Jahrzehnten eine wesentliche Verringerung zu beobachten. Feinstaub wird in Abhängigkeit der Partikelgröße in PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> unterteilt. PM<sub>10</sub> umfasst alle Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als 10 µm (Mikrometer) ist. PM<sub>2,5</sub> ist eine Teilmenge des PM<sub>10</sub> und umfasst dementsprechend alle Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als 2,5 µm ist. In der Richtlinie 2008/50/EG der EU (2008) und des Rates über Luftqualität und saubere Luft für Europa sind Grenzwerte für die Feinstaubbelastung festgelegt. Für den Feinstaub PM<sub>10</sub> sollte der Jahresmittelwert 40 µg/m<sup>3</sup> nicht übersteigen, der Tagesmittelwert von 50 µg/m<sup>3</sup> darf maximal 35mal im Jahr überschritten werden. Der Jahresmittelwert der Belastung mit Feinstaub PM<sub>2,5</sub> darf 25 µg/m<sup>3</sup> nicht übersteigen. Nach neueren Erkenntnissen im Jahr 2013 empfiehlt die EU-Kommission einen Richtwert für den Jahresmittelwert von 20 µg/m<sup>3</sup>. Seit dem Jahr 2012 wurde in Deutschland an keiner Messstation eine Grenzwertüberschreitung des PM<sub>10</sub>-Grenzwerts für das Jahresmittel mehr festgestellt. Die zulässige Anzahl an Überschreitungen des 24-Stunden-Mittelwertes wurde in den Jahren 2016 und 2017 nur noch an maximal 1 % der verkehrsnah gelegenen Messstationen überschritten. Im Jahr 2017 wurde tatsächlich nur noch an der Station Stuttgart, Am Neckartor die zulässige Anzahl an Überschreitungen des 24-Stunden-Mittelwertes übertroffen (Minkos et al. 2018: 8). Im Jahr 2018 wurde an einer industrienahen Messstation in Nordrhein-Westfalen die Anzahl der Tage mit mehr als 50 µg/m<sup>3</sup> um einen Tag überschritten (Minkos et al. 2019: 8). Die Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation für Feinstaubgrenzwerte sind teilweise deutlich strenger als die Vorgaben der EU (s. Tabelle 2).

Tabelle 2: EU-Grenzwerte und Empfehlung der WHO für Feinstaubgrenzwerte

Mittelungszeitraum	EU-Grenzwert	WHO-Empfehlung
PM <sub>10</sub>		
Kalenderjahr	40 µg/m <sup>3</sup>	20 µg/m <sup>3</sup>
Tag	50 µg/m <sup>3</sup> 35 Überschreitungen im Jahr	50 µg/m <sup>3</sup> 3 Überschreitungen im Jahr
PM <sub>2,5</sub>		
Kalenderjahr	25 µg/m <sup>3</sup>	10 µg/m <sup>3</sup>
Tag	-	25 µg/m <sup>3</sup> 3 Überschreitungen im Jahr

Trotz der bereits erzielten Reduktion der Luftbelastung mit Schadstoffen in Deutschland sind weitere Verbesserungen anzustreben, insbesondere wenn die Maßnahmen ohne Einschränkungen oder negative Nebeneffekte umsetzbar sind. Beispielsweise kann durch eine straßennahe Begrünung mit speziell ausgewählten Pflanzen, die ein hohes Feinstaubabscheidungspotential aufweisen, die Schadstoffbelastung der Luft reduziert werden. Dies ist auch für private Grundstücke an viel befahrenen Straßen von Bedeutung. Da eine erhöhte Belastung mit Luftschadstoffen in der Regel ein sehr kleinräumiges Phänomen ist, muss im Einzelfall entschieden werden, ob die im Projekt aufgezeigten Maßnahmen umgesetzt werden sollen. Weil eine Begrünung mit den hier vorgeschlagenen Pflanzen keine nachteiligen Nebeneffekte mit sich bringt, können sie auch bei unklarer Belastungssituation bedenkenlos gepflanzt werden. Darüber hinausgehende Maßnahmen zur Feinstaubabscheidung, wie die Verwendung aktiver Luftfiltersysteme, sind mit einem ständigen Energiebedarf verbunden. Deren Einsatz sollte auf kritische Punkte beschränkt bleiben. Auf das Feinstaubbindungspotential von Pflanzen wird in Kapitel 8.8 und Kapitel 9.4 näher eingegangen.

## 5. Analyse des momentanen Klimas sowie der erwarteten Klimaänderungen

### 5.1. Sommerhitze

Bei der Betrachtung der Temperaturerhöhung ist neben dem Mittelwert der Temperatur in diesem Fall vor allem die Untersuchung von Temperaturmaxima von Relevanz, da im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Resilienz der Gebäude gegenüber Hitze verbessert werden soll. Betrachtet man die mittlere Temperatur, so stellt sich ein für Deutschland überwiegend flächendeckendes Bild dar. Über den Zeitraum 1881 – 2013 stieg das Jahresmittel der Lufttemperatur um 1,2 °C.

Grundsätzlich erwärmen sich der Süden und der Westen Deutschlands etwas mehr als der Norden. Neben der räumlichen weitestgehenden Homogenität der Erwärmung ergibt sich auch eine saisonale Homogenität. Im Winter stieg die Temperatur im Mittel der Bundesrepublik Deutschland um 1,0 °C an, im Frühjahr um 1,3 °C, während die Temperaturerhöhungen im Sommer und im Herbst mit 1,2 °C dem Jahresmittel entsprechen. Im Hinblick auf die Temperaturextreme setzt sich der ansteigende Trend der Mitteltemperaturen fort. Als heiße Tage gelten in diesem Fall Tage, an denen eine Höchsttemperatur von 30 °C erreicht wird. Im Vergleich zum Zeitpunkt des Jahres 1954 erhöhte sich die mittlere Anzahl von heißen Tagen von drei Tagen auf acht Tage. In Abbildung 6 ist die Entwicklung der jährlichen Anzahl der heißen Tage mit der eingezeichneten Trendlinie dargestellt. In der Abbildung 7 ist die deutschlandweite Entwicklung der mittleren Anzahl der heißen Tage dargestellt. Hier wird deutlich, dass neben der zeitlichen Entwicklung auch eine räumliche Entwicklung auftritt. Die Gegend um den Rheingraben sowie südöstlich von Berlin sind die Regionen, in denen über den gesamten Untersuchungszeitraum die meisten heißen Tage auftreten. Nichtsdestotrotz lässt sich aus der Abbildung 7 erkennen, dass über Deutschland verteilt die Anzahl der heißen Tage zumindest bis zur Dekade 1994 – 2003 zugenommen hat. In der Dekade von 2004 – 2013 schwächte sich das Phänomen etwas ab, allerdings überschritt die Maximaltemperatur weiterhin in vielen Regionen für mindestens 10 Tage die 30 °C - Grenze (UBA 2015: 19). Die aus ebd. (2015: 17 ff.) hervorgehenden Resultate decken sich weitestgehend mit den gewonnenen Erkenntnissen aus den regionalen Monitoring- und Klimaanpassungsprogrammen.

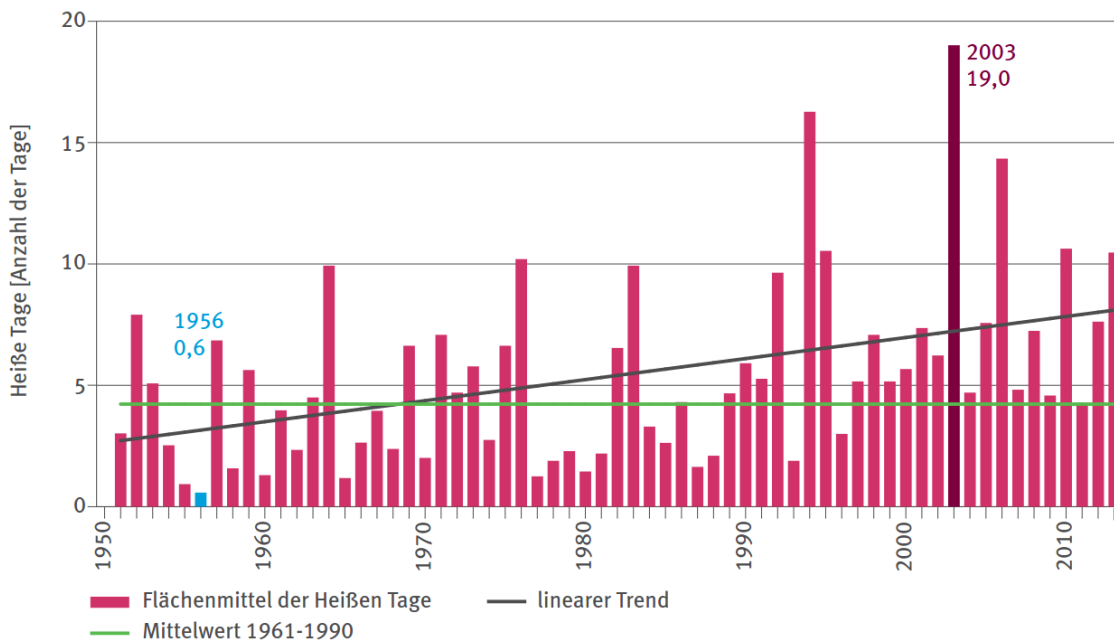


Abbildung 6: Jährliche Anzahl der heißen Tage mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 °C (UBA 2015: 18)

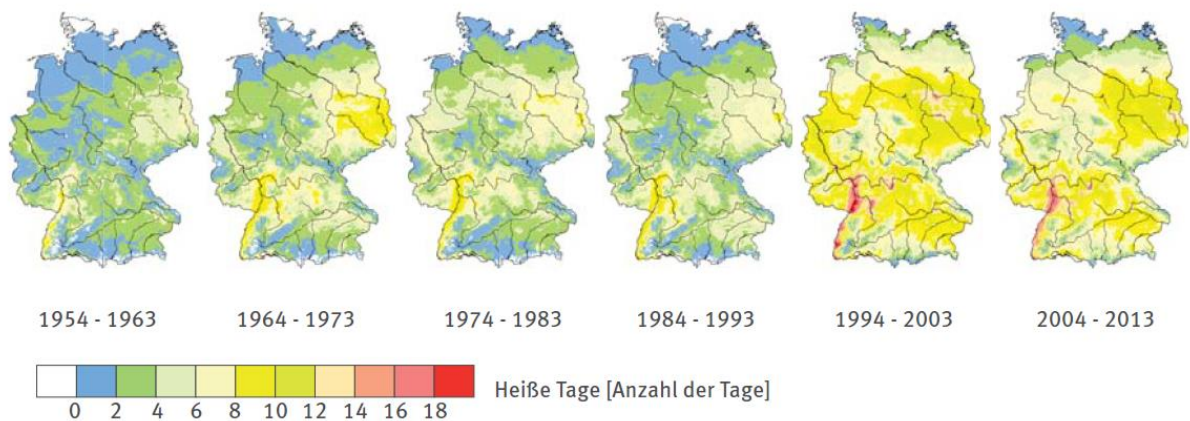


Abbildung 7: Mittlere jährliche Anzahl der heißen Tage (UBA 2015: 19)

Storch/Meinke/Claussen (2018: 23) stellten fest, dass in Hamburg für den Zeitraum von 1891 – 2007 ein statistisch signifikanter Trend von einer Zunahme von  $0,07 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Dekade}$  auftrat. Ebenso konnte im Hinblick auf die Temperaturextreme eine zunehmende Überschreitungswahrscheinlichkeit der 90 %-Perzentil-Schwelle festgestellt werden. Gerade in den Sommermonaten kam es zu einer starken Häufigkeitszunahme der Überschreitung. Für den Herbst konnte hingegen kein statistisch signifikanter Trend festgestellt werden. Ebenso zeigt sich, dass es nach 1994 zu vier Extremereignissen mit einem mittleren Temperaturmaximum von über  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  während einer Dauer von 14 Tagen kam, während dieses Ereignis vor 1994 kein einziges Mal auftrat. Auch in Niedersachsen decken sich die Resultate mit den deutschlandweiten Ergebnissen. Das NMUEK (2012: 18) zeigt eine Änderung der Temperatur für ganz Niedersachsen im Mittel von  $1,3 \text{ }^\circ\text{C}$  für den Zeitraum 1951 – 2005 und eine Erhöhung des 90 %-Quantils der Durchschnittstemperatur um  $1,6 \text{ }^\circ\text{C}$  auf. Auch auf saisonaler Ebene bestätigen sich die schon bekannten Trends. Im Winter, im Frühling und im Sommer kann die Zunahme der Temperatur als statistisch signifikant eingeordnet werden, während dies im Herbst nicht möglich ist.

Für die Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz konnte in der Klimakooperation „KLIWA“ ebenso ein Anstieg der mittleren Lufttemperatur festgestellt werden. Im Untersuchungszeitraum zwischen 1931 und 2015 weist die Temperaturentwicklung des Sommerhalbjahrs einen Anstieg zwischen  $0,8$  und  $1,2 \text{ }^\circ\text{C}/85$  Jahre auf während für das Winterhalbjahr eine Zunahme zwischen  $1,3$  und  $1,6 \text{ }^\circ\text{C}/85$  Jahre erfolgte. Sämtliche Trends in der Temperaturentwicklung haben hier ein sehr hohes Signifikanzniveau (s. Abbildung 8). Der Monitoringbericht trifft jedoch keine Aussage über die Entwicklung von Extremtemperaturereignissen. Es konnte lediglich festgehalten werden, dass es im Zeitraum zwischen 2011 und 2015 zu einer vermehrten Anzahl an Hitzewellen, bei denen an mehreren Tagen in Folge die maximale Temperatur größer oder gleich  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  erreichte. Die Jahre 2011, 2014 und 2015 liegen unter den zehn wärmsten Jahren bundesweit seit 1881 (KLIWA 2016: 3).

In Nordrhein-Westfalen bestätigen sich die gesamtdeutschen Ergebnisse. So kam es zu einem Anstieg der Jahresmitteltemperatur um  $1,4 \text{ K}$  zwischen 1881 und 2015. Zeitgleich kam es zu einem Anstieg der mittleren Anzahl der heißen Tage, also der Tage mit einer Maximaltemperatur von mindestens  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  um ca. 3 Tage (s. Abbildung 9). Auffällig ist dabei, dass die Zunahme der Anzahl der heißen Tage nicht linear sondern exponentiell erfolgt. Für den gesamten Zeitraum von 1881 bis 2015 kam es zu einer Erhöhung um  $0,2$  Tage pro Jahrzehnt, im Zeitraum 1951 - 2015 um  $0,8$  Tage pro Jahrzehnt und im Zeitraum 1981 - 2015 sogar zu einer Zunahme von  $1,1$  Tagen pro Jahrzehnt (LANUV 2010).

Pattantyús-Ábrahám/Steinbrecht (2015: 5712) konnten anhand der Homogenisierung der Daten aus der Temperaturmessung mit Radiosonden feststellen, dass es im Zeitraum der Messung von 1950 – 2013 zu einer Erhöhung der Temperatur in der Troposphäre von 0,2 K/Dekade kommt. Die festgestellte Erwärmung deckt sich mit den Erkenntnissen des Syntheseberichts des IPCC (2014: 8), der mit einer hohen Wahrscheinlichkeit davon ausgeht, dass die Anzahl der warmen Tage und Nächte gestiegen ist und die „Häufigkeit von Hitzewellen in weiten Teilen Europas, [...] zugenommen hat.“

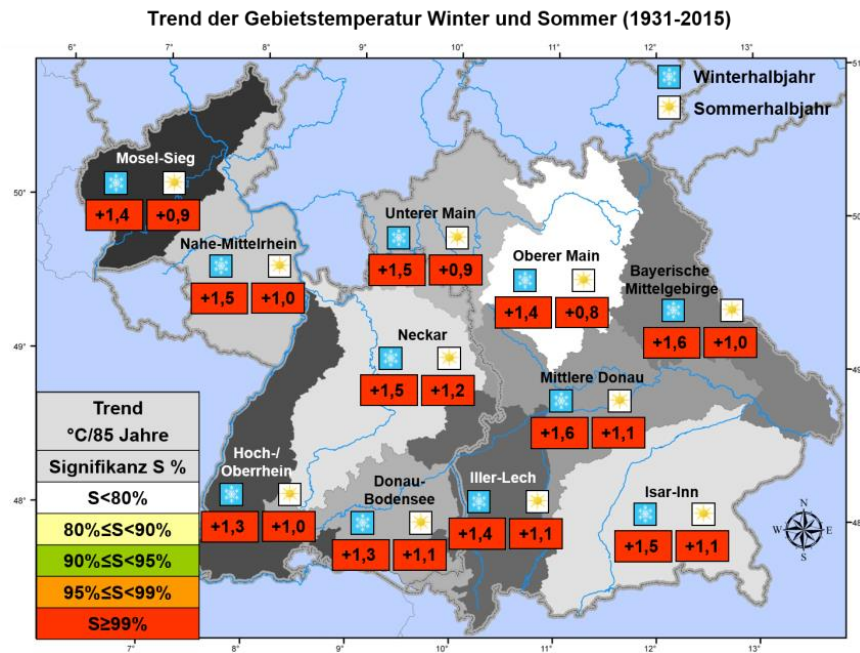


Abbildung 8: Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in den hydrologischen Halbjahren, Trend in °C/85 Jahre im Zeitraum 1931 – 2015 (KLIWA 2016: 21)

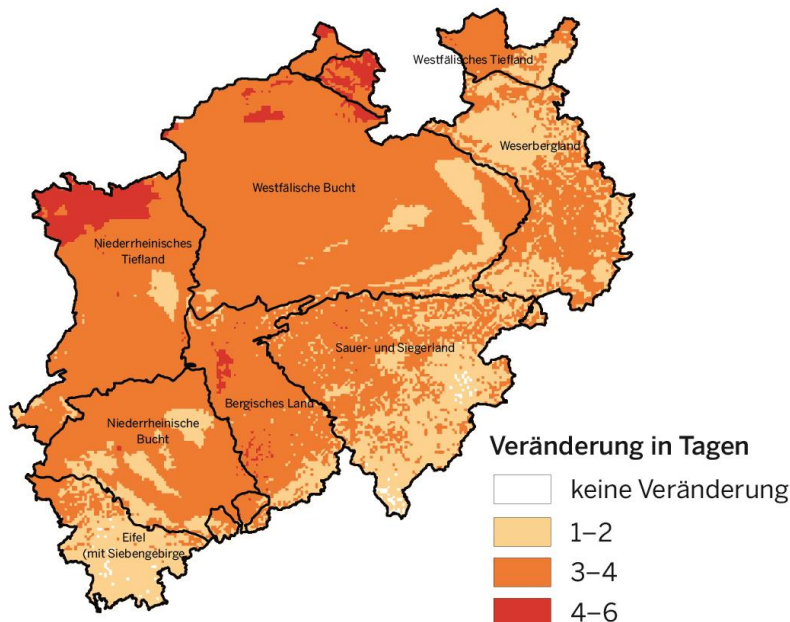


Abbildung 9: Veränderung der Anzahl der heißen Tage im Zeitraum 1981 – 2010 im Vergleich zum Zeitraum 1951 – 1980 in Nordrhein-Westfalen (LANUV 2016: 20)

Für die zukünftigen Entwicklungen gehen sämtliche Klimaprojektionen von einer weiteren Erwärmung des Klimas aus. Hübener et al. (2017: 15) simulierten im RCP2.6-Szenario 3,7 zusätzliche Hitzetage, und im RCP8.5 Szenario sogar 19,4 zusätzliche Hitzetage, also Tage mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 °C, bis Ende des 21. Jahrhunderts. Gleichzeitig gehen die Autoren von einer Zunahme der Anzahl an zusammenhängenden Tagen einer Hitzeperiode aus. Auch im Hamburger Klimabericht gehen Storch/Meinke/Claussen (2018: 31) von einer Zunahme der Hitzetage mit einer Maximaltemperatur von 30 °C aus. Ebenso simulierten die Klimaprojektionen dieses Ensembles eine Zunahme von tropischen Nächten mit einer Mindesttemperatur von 20 °C um 4 Tage (RCP2.6) bis 34 Tage (RCP8.5). Jacob et al. (2014: 566) erwarten nach Auswertung des EURO-CORDEX Ensembles eine Temperaturerhöhung je nach Emissionsszenario von 1 °C bis zu 5,5 °C. Die Landesanstalt für Umwelt, Messung und Naturschutz Baden-Württemberg nimmt in LUBW (2013: 45) eine Zunahme des Median der Anzahl der Tropentage für die nahe Zukunft (2021 - 2050) um 2,7 Tage und für die ferne Zukunft (2071 - 2100) um 20,8 Tage an.

In Abbildung 10 ist die Entwicklung der mittleren Lufttemperatur im Zeitraum 2070 - 2100 für den Sommer dargestellt. Hier wird deutlich, dass sich das 95 %-Perzentil der Durchschnittstemperatur um bis zu 5,5 K verschiebt. Ebenso zeigt sich, dass im Süden Deutschlands von einer höheren Erwärmung auszugehen ist als in Norddeutschland. Das Ensemble dieses Klimamodells beruht auf dem A1B-Szenario.

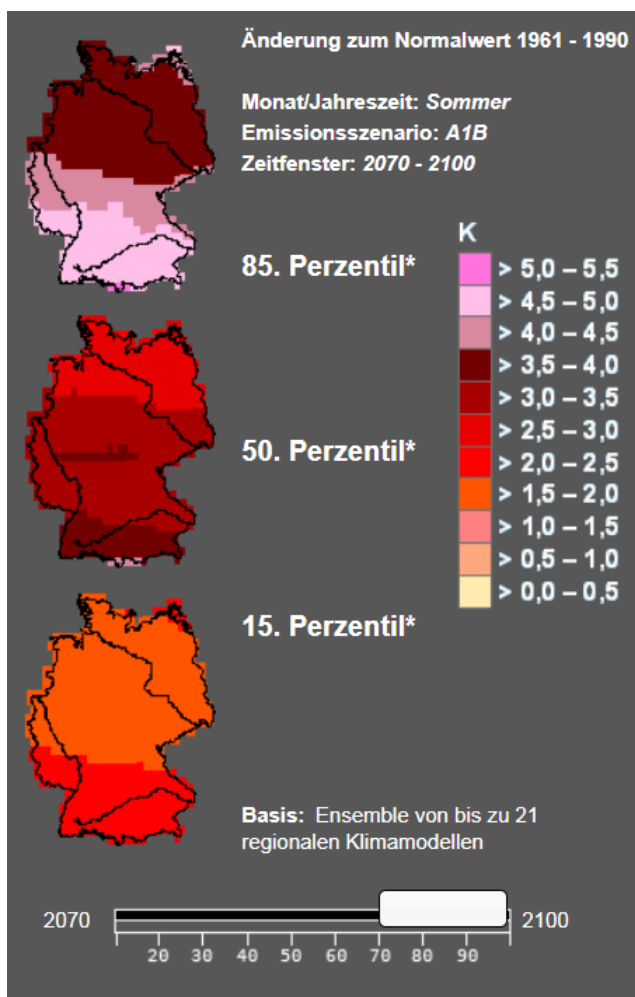


Abbildung 10: Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in K im Sommer unter Verwendung des Klimaszenarios A1B für das Zeitfenster 2070 - 2100 (DWD 30. 10. 2018)

## 5.2. Starkregen

Starkregen ist ein Klimaereignis, bei dem innerhalb von kurzer Zeit große Niederschlagsmengen auftreten. Der Deutsche Wetterdienst definiert entsprechende Schwellenwerte und teilt diese in vier Stufen ein (DWD 12. 09. 2018). Die Schwellenwerte für Starkregen sind in der Tabelle 3 dargestellt. Als Beispiele aus der jüngeren Vergangenheit für Starkregenereignisse dient die Überflutung von Braunsbach im Kreis Heilbronn oder Simbach/Inn aus dem Mai bzw. Juni 2016 (DWD 2016a: 78 f.). Starkregen kann zu hohen Schäden führen, da innerhalb kürzester Zeit große Mengen an Regenwasser auftreten, die für Überflutungen von Siedlungsgebieten und Häusern führen können. Bäche können sich innerhalb weniger Minuten in turbulente Flüsse verwandeln. Als kritisch erweisen sich häufig Entwässerungssysteme, die sich für einen Starkregen als unterdimensioniert erweisen und ihre Gebrauchstauglichkeit einbüßen.

Neben einem zeitlich eng begrenzten Starkregen erweisen sich Dauerregen ebenso als Gefährdungspotential. Bei längeren Regenfällen können Flüsse über die Ufer treten, was eine Bedrohung von Siedlungsräumen darstellt. Als Beispiel für eine Überflutung aufgrund von Dauerregen gelten das Hochwasser der Elbe im August 2002 sowie der Elbe und der Donau im Juni 2013 (DWD 2016a: 101 ff.). Die vom Deutschen Wetterdienst definierten Schwellenwerte für Dauerregen sind ebenso in der Tabelle 3 dargestellt. Dieses Wetterereignis ist jedoch eher für Hochwasser relevant, sodass dieser Abschnitt im Kapitel 5.3 näher betrachtet wird.

Tabelle 3: Schwellenwerte für unterschiedliche Wetterwarnungsstufen (DWD 30. 10. 2018)

Stufe	Bezeichnung	Starkregen	Dauerregen
1	Wetterwarnungen	n.n.	n.n.
2	Warnungen vor markantem Wetter	15 - 25 l/m <sup>2</sup> in 1 Stunde	25 - 40 l/m <sup>2</sup> in 12 Stunden
		20 - 35 l/m <sup>2</sup> in 6 Stunden	30 - 50 l/m <sup>2</sup> in 24 Stunden
			40 - 60 l/m <sup>2</sup> in 48 Stunden
			60 - 90 l/m <sup>2</sup> in 72 Stunden
3	Unwetterwarnungen	> 25 l/m <sup>2</sup> in 1 Stunde	> 40 l/m <sup>2</sup> in 12 Stunden
		> 35 l/m <sup>2</sup> in 6 Stunden	> 50 l/m <sup>2</sup> in 24 Stunden
			> 60 l/m <sup>2</sup> in 48 Stunden
			> 90 l/m <sup>2</sup> in 72 Stunden
4	Warnungen vor extremem Unwetter	> 40 l/m <sup>2</sup> in 1 Stunde	> 70 l/m <sup>2</sup> in 12 Stunden
		> 60 l/m <sup>2</sup> in 6 Stunden	> 80 l/m <sup>2</sup> in 24 Stunden
			> 90 l/m <sup>2</sup> in 48 Stunden
			> 120 l/m <sup>2</sup> in 72 Stunden

Anmerkung: Die Wetterwarnstufe 1 ist für andere Einwirkungen (Nebel, Schnee, Hagel etc.) definiert, jedoch nicht für Starkregen. Die Stufe 1 wird hier nur aus Gründen der Vollständigkeit aufgeführt.

Starkregenereignisse sind in ihrem Auftreten lokal sehr begrenzt und daher schwer vorherzusagen. Ebenso werden durch die starke räumliche Eingrenzung nicht alle Ereignisse durch eine Wetterstation registriert. Die Vorhersage solcher Ereignisse ebenso wie die nachträgliche Betrachtung der Ereignisse fällt durch die begrenzte räumliche Ausdehnung äußerst schwierig (Weller et al. 2016: 182). Dadurch fällt auch die statistische, flächendeckende Auswertung für Deutschland und die Ableitung von Trends bezüglich von Extremniederschlägen schwer. Im ersten Klimabericht für die Metropolregion Hamburg (Storch/Claussen/KlimaCampus Autoren Team 2011: 52 f.) wurde festgestellt, dass es in der Auswertung des Zeitraums von 1951 - 2000 im Winter zu einer Zunahme der Wahrscheinlichkeit der Überschreitung des 90 %-Quantils der maximalen Niederschlagshöhe kam, während im Sommer diese eher abnahm.

In den Übergangsjahreszeiten Frühjahr und Herbst konnte keine nennenswerte Veränderung festgestellt werden. Dies deckt sich mit der Einschätzung mehrerer Forschungsergebnisse, dass der Klimawandel in Deutschland zu feuchteren Wintern und trockeneren Sommern führt oder bereits geführt hat (Schönwiese/Janoschitz 2008: 18; UBA 2015: 16 ff.). Hoffmann (2009: 40) und Storch/Claussen/KlimaCampus Autoren Team (2011: 43 ff.) stellten ebenso fest, dass die absolute Niederschlagssumme in der Region Norddeutschland im Zeitraum von 1891 bis 2007 um ungefähr 14 % angestiegen ist, gleichzeitig die Anzahl von Tagen mit Niederschlag jedoch nahezu konstant blieb. Neben einer mittleren Abnahme von Schwachregenereignissen von 6 % ergaben die Untersuchungen, dass die Anzahl der Niederschlagsereignisse mit mehr als 10 l/m<sup>2</sup> über den Untersuchungszeitraum um 24 % zunahm. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Zunahme von Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen ein wesentlicher Grund für die Zunahme des Jahresniederschlags ist. In der Kooperation Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA) wurde in den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz ein gemeinsames Klimamonitoring im Zeitraum 1931 - 2015 durchgeführt. Im Monitoringbericht von 2016 (KLIWA 2016: 29 f.) konnte ein klarer Trend der Zunahme von Starkniederschlägen mit einer Dauer von 24 Stunden im Winterhalbjahr festgestellt werden. Bei der Betrachtung des hydrologischen Winterhalbjahres trat an mehreren Standorten des Untersuchungsgebiets eine prozentual hohe Zunahme der Gebietsniederschlagshöhen auf. Gerade im Nordosten des Bundeslands Bayern und im Südwesten des Bundeslands Baden-Württemberg ist ein Anstieg der Niederschlagshöhe bei Starkregenereignissen zu beobachten (Abbildung 11). Die statistische Signifikanz gibt dabei die Wahrscheinlichkeit an, dass das Ereignis eintritt.

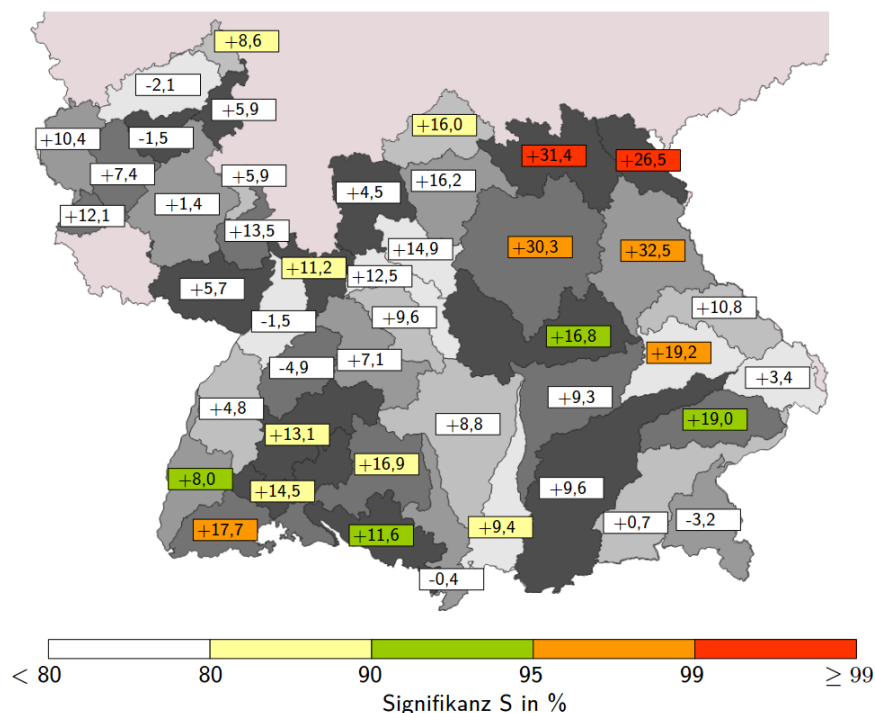


Abbildung 11: Entwicklung der maximal eintägigen Gebietsniederschlagshöhe im hydrologischen Winter in mm (KLIWA 2016: 30)

Im hydrologischen Sommer hingegen zeigt sich an verschiedenen Standorten eine statistisch signifikante Abnahme der Gebietsniederschlagshöhen. Gerade im Unterlauf des Mains sowie im Südwesten des Bundeslands Rheinland-Pfalz können starke Abnahmen festgestellt werden, die auch eine statistische Relevanz aufweisen (Abbildung 12). Wie allerdings bereits beschrieben, ist auch bei dieser Studie keine klare Aussage über kurzzeitige Starkregenereignisse möglich, da die zeitliche Auflösung der Messreihen zu gering ist.



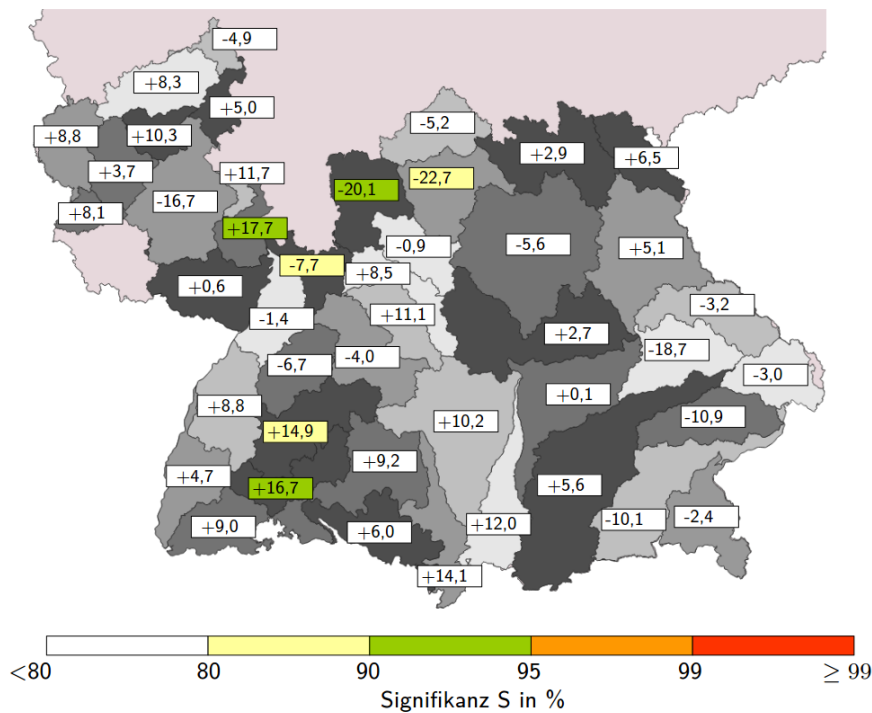


Abbildung 12: Entwicklung der maximal eintägigen Gebietsniederschläge im hydrologischen Sommer in mm (KLIWA 2016: 30)

Im Bundesland Thüringen wurde ein Monitoringprogramm zur Untersuchung der Klimaentwicklung ins Leben gerufen. Dabei wurde der aktuelle Zeitraum der klimatologischen Standardnormalwerte, der von 1987 - 2016 reicht, mit der Referenzperiode 1961 - 1990 verglichen. Auffällig ist, dass es in den Höhenlagen der Mittelgebirge zu einer erheblichen Zunahme der Starkniederschläge gekommen ist, sowohl bei den kurzzeitigen Starkregenereignissen als auch bei den langfristigen Regenfällen. In Abbildung 13 zeigt sich, dass es in den Kammlagen des Thüringer Waldes, in Ostthüringen sowie in Teilen Mittelthüringens zu einer deutlichen Zunahme der Schwellwerte für ein einjähriges Niederschlagsereignis kommt. Die Zunahme von Starkregenereignissen erfolgt hauptsächlich im Winter. In Verbindung mit den gefrorenen Böden sowie Tauwetter besteht die Gefahr von Winterhochwassern (TMUEN 2017: 32).

Im Rahmen der Studie „Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS)“ wurde der Untersuchungszeitraum zwischen 1950 und 2010 im Hinblick auf Starkniederschläge für das Bundesland Nordrhein-Westfalen (NRW) ausgewertet, um Rückschlüsse auf die Entwicklung von Starkregenereignissen der letzten Jahrzehnte zu ziehen. Es wird deutlich, dass die Summe des Niederschlags über das Jahr gesehen zunimmt. Die Trends an den Untersuchungsstationen sind weitestgehend mit einer hohen Signifikanz versehen. Wie bereits im bisherigen Verlauf dieses Kapitels erwähnt, fällt aber bei einer Aufteilung des Betrachtungszeitraums in hydrologische Halbjahre auf, dass es im hydrologischen Winterhalbjahr in NRW zu einer erheblichen Steigerung der Niederschläge kommt, die mit einer entsprechenden Signifikanz belegt ist. Im hydrologischen Sommerhalbjahr hingegen kommt es eher zu einer Abnahme der Niederschläge. Betrachtet man die Starkniederschläge, so lässt sich keine statistisch relevante Erkenntnis aus der Datenanalyse ziehen, auch wenn sich die Regenhöhen der kurzen Dauerstufen in der jüngeren Vergangenheit erhöht haben. Auch über eine Zunahme der Häufigkeit von Starkregenereignissen können keine Aussagen getroffen werden, da neben der Veränderung des Klimas auch die Veränderung der Messtechnik die Daten beeinflusst. Dennoch wird es in der Studie als wahrscheinlich angenommen, dass die Anzahl der als „Starkregen“ einzuordnenden Wetterereignisse zunimmt (LANUV 2010: 299).

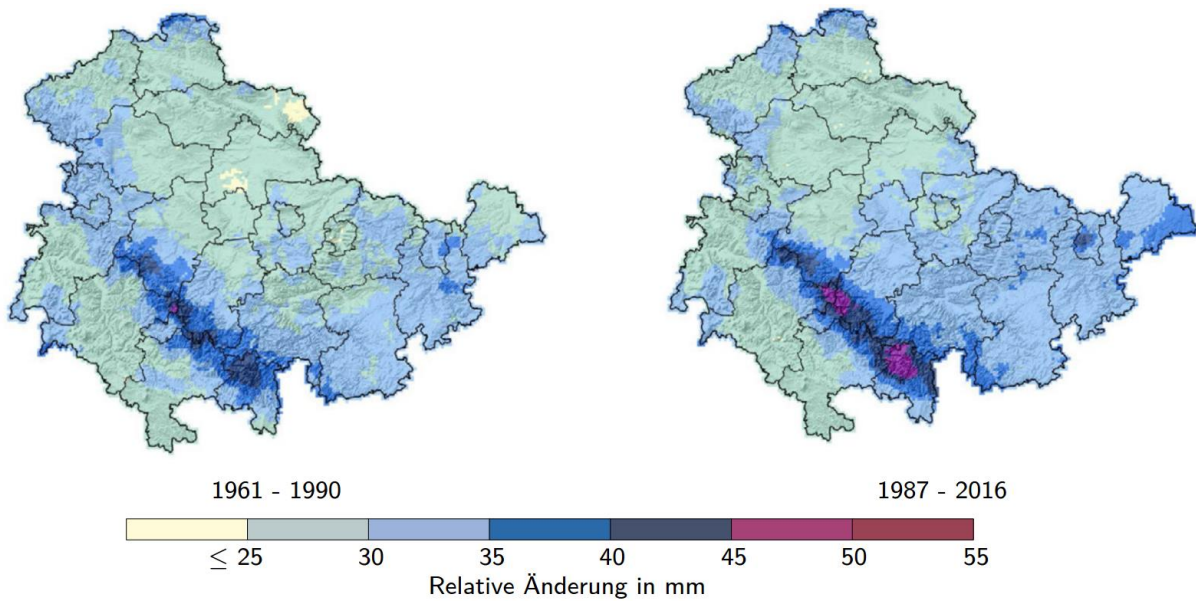


Abbildung 13: Entwicklung der Niederschlagshöhe in mm von Starkregenereignissen in Thüringen vom Zeitraum 1961 - 1990 zum Zeitraum 1987 - 2016 (TMUEN 2017: 33)

Für das Bundesland Niedersachsen konnten Haberlandt/Belli/Hölscher (2010: 35) zeigen, dass sich die Verteilung des Starkregens in den Winter verlagerte. Als maßgebend wird dabei die Überschreitung des 90 %-Quantils der Tagesniederschlagssummen angenommen. In Abbildung 14 ist die räumliche Verteilung der Überschreitung im Winterhalbjahr dargestellt. Zusätzlich zu der Überschreitung des 90 %-Quantils konnte in der Studie gezeigt werden, dass der Anteil der Starkregenereignisse am Gesamtniederschlag im Untersuchungszeitraum deutlich angestiegen ist (s. Abbildung 15).

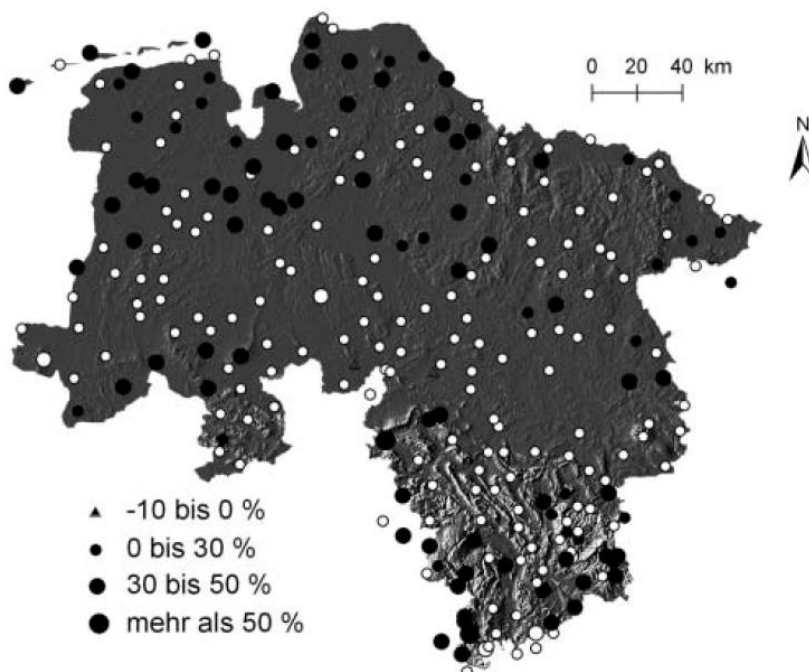


Abbildung 14: Räumliche Verteilung der Trends für die Entwicklung des 90 %-Quantils der Tagesniederschläge im Winter, Zeitraum 1951 - 2005 (Kreise = positive Trends, Dreiecke = negative Trends, ausgefüllte Symbole = signifikante Trends, Größe der Symbole zeigt Stärke der Trends (Haberlandt/Belli/Hölscher 2010: 33)

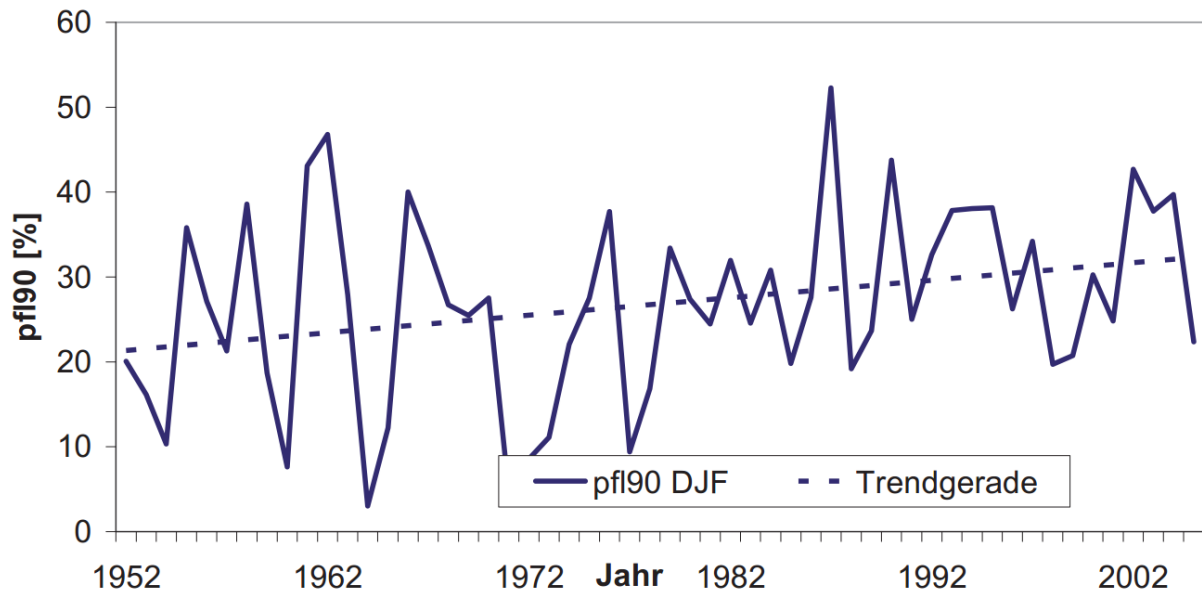


Abbildung 15: Anteil der Niederschläge oberhalb des 90 %-Quantils der maximalen Niederschlagshöhen am Gesamtniederschlag (Haberlandt/Belli/Hölscher 2010: 34)

Der Deutsche Wetterdienst wertet Starkniederschlagsereignisse in Deutschland im Zeitraum 1951 – 2010 aus und überträgt die Daten auf ein deutschlandweites Rasternetz in seinem Programm „KOSTRA-DWD“ (Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des DWD). Da das Programm seit über 30 Jahren fortlaufend aktualisiert wird, können auch hier Gebiete mit einer Veränderung der Starkniederschlagshöhen detektiert werden. In Abbildung 16 sind die Änderungssignale für die Dauerstufen  $D = 15$  min (a),  $D = 60$  min (b),  $D = 24$  h (c) und  $D = 72$  h (d) für ein Starkregenereignis mit der Wiederkehrdauer von 100 Jahren im Vergleich mit dem Betrachtungszeitraum 1951 – 2000 (KOSTRA-DWD-2000) dargestellt. Für die Dauer  $D = 15$  min konnte eine starke Zunahme in Nordrhein-Westfalen, in der Region um Bremen, in Nordosten Baden-Württembergs und im Nordosten Mecklenburg-Vorpommerns festgestellt werden. Für die Dauer  $D = 60$  min nahmen die Starkregenhöhen flächendeckend zu. Gerade in den Regionen Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Hessen, Baden-Württemberg sowie im Alpenvorland und an der Ostseeküste von Schleswig-Holstein zeigt sich eine deutliche Zunahme der Niederschlagshöhen (Junghänel/Ertel/Deuschländer 2017: 6). Auch bei Betrachtung der Dauerstufen  $D = 24$  h und  $D = 72$  h kam es zu einer Zunahme der Niederschlagshöhen. Betroffen sind hier vor allem die Alpen, das Alpenvorland und die Mittelgebirge wie der Harz, das Erzgebirge und der Schwarzwald. Weitere Zunahmen finden sich im Norden Nordrhein-Westfalens sowie im Bereich um und nördlich von Hamburg. Auch wenn an dieser Stelle nur der Vergleich zwischen den Zeiträumen von KOSTRA-DWD-2010 und KOSTRA-DWD-2000 erfolgt, zeigen sich die Trends, die im bisherigen Verlauf dieser Arbeit in der jeweiligen Region festgestellt wurden, deutlich auf.

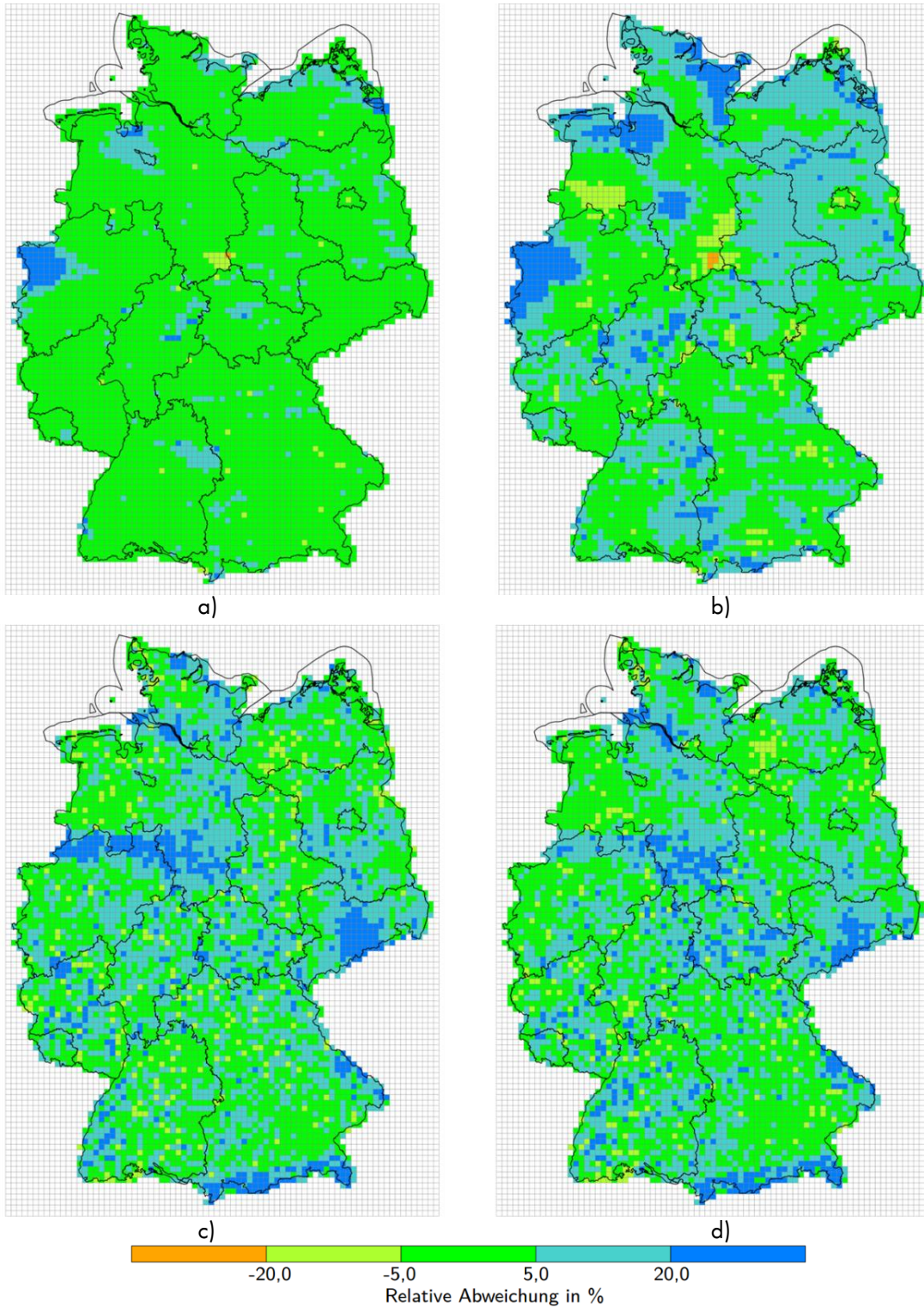


Abbildung 16: Änderungssignale unterschiedlicher Niederschlagsdauerstufen von KOSTRA-DWD-2010 zu KOSTRA-DWD-2000 in % (a: D = 15 Min, b: D = 60 min, c: D = 24 h, d: D = 72 h)(Junghänel/Ertel/Deutschländer 2017: 7)

Zusammenfassend betrachtet ist es jedoch schwer, allein aus den Beobachtungsdaten eine Tendenz bezüglich des Auftretens von Starkregenereignissen abzuleiten. Wie das Landesamt für Umweltschutz in Sachsen-Anhalt in LAU (2016: 64 f.) feststellte, findet sich in den Klimadaten für Sachsen-Anhalt keine Auffälligkeiten oder Trends, die auf eine beobachtbare Zunahme von Starkregenereignissen schließen lassen. Der Unterschied in der Auswertung liegt mehr in den räumlichen Unterschieden als in zeitlichen Trends. Entwicklungen in der Klimaanalyse können zudem ihren Grund in der Modernisierung der Messtechnik haben und sind nicht zweifelsfrei auf den Klimawandel zurückzuführen.

Murawski/Zimmer/Merz (2016: 2589 ff.) konnten ebenso feststellen, dass die Veränderung des Niederschlags sehr räumlich und saisonal bedingt ist. Während sich die Niederschläge im Winter, Frühjahr und Herbst in einigen Regionen Deutschlands im Zeitraum 1951 - 2006 verstärkt haben, sind die Sommer eher trockener geworden. In der Studie werden ebenso die einzelnen Monate auf Veränderung im Niederschlagsverhalten untersucht. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass bei der Betrachtung von saisonalen Veränderungen von Regenereignissen die einzelnen Monate differenziert betrachtet werden müssen. So ist beispielsweise im Frühjahr der März der Monat, der die Summe der Niederschläge positiv beeinflusst während sich die Zunahme im Herbst sogar räumlich unterscheidet. Der Oktober war während des Untersuchungszeitraums für eine Erhöhung der Niederschlagssumme im Schwarzwald verantwortlich, während die Erhöhung der Niederschläge im Südosten und in Mitteldeutschland ihren Grund in einer Niederschlagszunahme im November findet.

Grundlegend kann festgehalten werden, dass sich aus der Analyse der Klimadaten eine Zunahme der Niederschlagssumme im Winter und ein leichter Rückgang der Niederschlagssummen im Sommer eingestellt hat. Weiterhin sind die Mittelgebirge in Hessen, NRW, Sachsen, Sachsen-Anhalt oder Baden-Württemberg und Bayern eher von stärkeren Regenfällen betroffen als flachere Gebiete. Aus der Analyse der Datensätze ergibt sich, dass sich der Anteil der Starkregentage an der Gesamtniederschlagssumme deutlich erhöht. Gleichzeitig hat sich auch der Jahresniederschlag erhöht. Dies lässt darauf schließen, dass es bei gleichzeitigem Rückgang der Niederschlagssumme im Sommer, es mehr und intensivere Regenfälle im Winter gegeben haben muss. Neben der Analyse der gemessenen Daten ist die Analyse der Klimaprojektionen wichtig, um Expositionsklassen definieren zu können. Da Starkregen ein sehr regional auftretendes Ereignis ist, müssen die globalen Klimamodelle, die in IPCC (2014) verwendet werden, regional verfeinert werden. Im Projekt „Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland“ (ReKliEs-De) konnte eine hervorragende Datenbasis zur Erforschung des Klimawandels in Deutschland und Europa gelegt werden. Hübener et al. (2017: 4) erzeugten hochaufgelöste Klimaprojektionen (räumliche Gitterweite 12 km), die neben den bereits bestehenden ENSEMBLE-Simulationen auch die aus dem Europäischen Forschungsprojekt EURO-CORDEX entwickelten Klimaprojektionen berücksichtigen. Das ReKliEs-DE-Untersuchungsgebiet berücksichtigt neben Deutschland auch die relevanten Flusseinzugsgebiete von Donau, Rhein, Elbe, Weser und Ems.

In sämtlichen Klimaprojektionen des Forschungsprojekts kommt es zu einer positiven Änderung der Anzahl der Tage mit einem Niederschlag > 20 mm/Tag im Winter. Für das Emissionsszenario RCP2.6 liegt die Zunahme zwischen -5 und +30 % und für das Emissionsszenario RCP8.5 zwischen 0 bis 60 % bis zum Jahr 2100. Ebenso nimmt in nahezu allen Simulationen die Niederschlagsmenge oberhalb des 99 %-Perzentils des maximalen Niederschlags des Projektionszeitraums 2071 - 2100 im Vergleich zum Zeitraum 1971 - 2000 zu. Das 99 %-Perzentil stellt eine Grenze dar, unter der sich 99 % der Untersuchungswerte befinden. Die Zunahme tritt auch ein, wenn aus der Simulation eine Abnahme der mittleren jährlichen Niederschlagsabnahme festgestellt wird.

Zusätzlich zur Anzahl der Tage mit Starkniederschlag untersuchte das Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) die zeitliche Entwicklung der Starkniederschlagshöhe. Die Starkniederschlagshöhe ist die maximale Niederschlagshöhe, die innerhalb eines Tages gemessen wird (LUBW 2013: 28). Die Autoren gehen nach Auswertung der verwendeten Klimaprojektionen sowie des beobachteten Werts (40,7 mm) von einer Zunahme der mittleren Starkniederschlagshöhe auf 43,3 mm für die nahe Zukunft (2021 – 2050) und auf 45,9 mm für die ferne Zukunft (2071 – 2100) aus (ebd.: 28). Dies bedeutet Zunahmen von 6,4 % bzw. 12,8 %. Die Datengrundlage der Simulationen sind die SRES-Szenarien des IPCC (IPCC 2000: 167 ff.). Storch/Meinke/Claussen (2018: 31 ff.) gehen unter Verwendung der RCP-Szenarien von einer stärkeren Zunahme hoher Niederschlagsmengen gegen Ende des 21. Jahrhunderts aus. Gleichzeitig wird auch in diesem Klimaprojektions-Ensemble mit einer starken Zunahme von Niederschlagstagen mit mehr als 10 bzw. 20 mm Niederschlag in allen Jahreszeiten außer im Sommer gerechnet. Jacob et al. (2014: 568) verwendeten für ihre Klimaprojektionen ebenfalls EURO-CORDEX. Die Projektionen gehen für das Emissionsszenario RCP8.5 von einer Zunahme der Starkniederschläge von bis zu 35 % aus. Starkniederschläge werden hier als Niederschläge definiert, die das 95 %-Perzentil des maximalen Niederschlags überschreiten. Zur Berücksichtigung der Änderungen aus dem Klimawandel wurden in den Grundlagen für Technische Regeln für Anlagensicherheit (TRAS) 310 nach dem Vorbild von LUBW (2005: 41 ff.) (s. Kapitel 5.3) ein Klimaänderungsfaktor für Bemessungshochwasser und Starkregenhöhen definiert (Köppke et al. 2012: 29 ff.). Dieser Klimaänderungsfaktor beträgt pauschal 1,2 und bezieht sich auf die in Junghänel/Ertel/Deuschländer (2017) ermittelten Bemessungswerte aus KOSTRA-DWD-2010. Der Klimaänderungsfaktor berücksichtigt alle Änderungen bis 2050, die auf den Klimawandel zurückzuführen sind, sofern der Einfluss des Klimawandels noch nicht in der Datengrundlage berücksichtigt wurde. Er wird alle fünf Jahre aktualisiert (Köppke et al. 2012; BMUB 2016a: 22), wobei die erste Aktualisierung nach Auskunft des Umweltbundesamtes allerdings erst für das Jahr 2019/2020 erwartet wird (Fendler 2018).

### 5.3. Hochwasser

Die Entwicklung der Anzahl und die Zunahme der Scheitelhöhe von Hochwassern steht im direkten Zusammenhang mit der Einwirkung Starkregen. Bei der Betrachtung von Hochwassern muss zwischen zwei Typen von Hochwassern unterschieden werden, dem Winterhochwasser und dem Sommerhochwasser. Winterhochwasser entwickeln wie in Kapitel 5.2 bereits erwähnt ihre Gefahr aus dem geringen Retentionspotential des zumindest teilweise gefrorenen Bodens und dem gleichzeitig auftretenden Tauwetter. Durch die zu erwartende Zunahme der Starkregenfälle im Winter besteht ein erhöhtes Risiko des Auftretens von Hochwassern. Winterhochwasser in Deutschland treten auf, wenn im Winter warme und feuchte Luftmassen zu einem erhöhten Niederschlag und gleichzeitig zu einer höheren Schneeschmelze führen (CSC 8. 10. 2018).

Im Unterschied zum Winterhochwasser liegen den Sommerhochwassern andere Wetterlagen zugrunde. Feuchte Tiefdruckgebiete, die über dem Mittelmeer viel Wasser aufgenommen haben, ziehen östlich an den Alpen vorbei und regnen sich dort an den Mittelgebirgen wie beispielsweise dem Erzgebirge ab. Diese Wetterlagen können über einen längeren Zeitraum anhalten und führen zu ergiebigem Dauerregen. Folgen mehrere dieser Wetterlagen aufeinander führt dies zu Hochwassersituationen wie dem Hochwasser der Elbe aus dem Jahr 2012 (CSC 8. 10. 2018). Zusätzlich zu den Hochwassertypen, die auf Starkregen oder Dauerregen beruhen, existieren Küstenhochwasser und Grundhochwasser.

Uhlemann/Thielen/Merz (2010: 1286 ff.) erfassten in einer Studie alle zwischen 1952 und 2002 in den deutschen Einzugsgebieten des Rheins, der Ems, der Weser, der Donau, der Elbe und der Oder aufgetretenen Hochwasser. Die Autoren stellten fest, dass sich die Anzahl der extremen flussbeckenübergreifenden Hochwasser im Zeitraum von 1978 - 2002 im Vergleich zum Zeitraum 1952 - 1977 nahezu verdoppelt hat.

Extreme Hochwasser werden in der Studie als Hochwasser definiert, die mehr als 50 % des gesamten Flussnetzwerks beeinträchtigen. Neben einer Zunahme der Anzahl an schweren Hochwassern zeigt sich in der Studie ebenso deutlich, dass der Anteil der Winterhochwasser an den Hochwassern eines Jahres von der ersten zur zweiten Untersuchungsperiode von 58 % auf knapp 70 % angestiegen ist. Bei der Einwirkung Hochwasser spielt jedoch der regionale Einfluss eine starke Rolle, sodass keine allgemein gültige Aussage für Deutschland getroffen werden kann. Die Veränderungen in der Überflutungsgefahr für die Regionen West, Ost und Süd im Zeitraum von 1951 bis 2002 untersuchten Petrow/Zimmer/Merz (2009: 1414 ff.). Für den Westen Deutschlands ist demnach mit einem Anstieg der Abflussspitze im Winter zu rechnen. Die Zunahme resultiert aus der Erhöhung der Dauer von Großwetterlagen mit West- und Nordwestwinden, die in zyklonale Richtung, also entgegen des Uhrzeigersinns drehen. Für Westdeutschland konnte, wie im Kapitel 5.2 bereits erwähnt, eine Zunahme der Gesamtniederschläge und eine Erhöhung der Intensität im Winter festgestellt werden.

Für den Osten Deutschlands konnte in der Studie ebenso festgestellt werden, dass sich die Frequenz und die Dauer der Wetterlagen, die einen potenziellen Auslöser von Winterhochwasser darstellen, erhöhen. Bei einer gleichzeitigen Abnahme der trockenen, kontinentalen Winterwetterlagen führt dies zu einer Verdreifachung der Anzahl an Regentagen im Winter. Für Sommerhochwasser ist kein statistisch signifikanter Trend zu erkennen, die Autoren gehen jedoch davon aus, dass eine Abnahme des Flutrisikos für den Sommer möglich ist. Im Süden Deutschlands ist von einer Zunahme der Wetterlagen, die Sommerhochwasser auslösen, auszugehen. Dies beinhaltet unter anderem schwere konvektive Regenfälle, die zu lokalen Hochwassern führen. Winterhochwasser spielen im Süden Deutschlands eine untergeordnete Rolle. Neben dem Faktor Niederschlag wird die Hochwassergefahr ebenso vom Faktor Temperatur beeinflusst. Durch die Temperaturerhöhung besitzt die Atmosphäre eine erhöhte Wasseraufnahmekapazität, was zu intensiveren Regenfällen führt (DWD 2016: 3). Hattermann et al. (2013: 1) stellten fest, dass der zunehmende Klimawandel zu einer erhöhten Hochwasserbedrohung beiträgt. Auch das Klimamonitoring einzelner Regionen geht von ähnlichen Annahmen aus. In TMUEN (2017: 54 f.) wurde zwar für die vergangenen Jahre eine erhöhte Bedrohungslage beobachtet, allerdings können keine statistisch signifikanten Entwicklungstrends festgestellt werden. Auch in KLIWA (2016: 31 ff.) wurden für den Untersuchungszeitraum 1932 – 2015 für das Winterhalbjahr steigende mittlere Abflüsse und für das Sommerhalbjahr abnehmende mittlere Abflüsse festgestellt. Allerdings sind auch hier nur 38 % der Trends der untersuchten Pegel signifikant. Aus den vorhandenen Untersuchungen kann gefolgert werden, dass durch die Zunahme der meteorologischen Voraussetzungen und der begünstigenden Großwetterlagen die Grundlagen für das Entstehen von Hochwassern geschaffen werden. Ebenso muss jedoch erwähnt werden, dass eine Vielzahl der Trends an den Pegelstationen keine oder nur eine geringe statistische Signifikanz aufweisen (CSC 8. 10. 2018).

Für Deutschland existieren Hochwassergefahrenkarten, in denen für jedes Grundstück im Untersuchungsgebiet Informationen über die Überflutungsgefahr und den Wasserstand bei Hochwassern unterschiedlicher Jährlichkeiten entnommen werden können. Die Betrachtung erfolgt nur für Hochwasser, die aus dauerhaften Niederschlägen resultieren. Für Hochwasser, die sich innerhalb kürzester Zeit aufgrund von Extremniederschlägen bilden, gelten andere Gesetzmäßigkeiten und andere Auswirkungen, da diese Art von Hochwasser kein zusammenhängendes Gebiet dauerhaft unter Wasser setzt. Ebenso treten diese Art von Niederschlägen sehr lokal auf. Sie werden als sogenannte Hangwasser oder wild abfließende Oberflächenwasser bezeichnet. Neben der Überflutungstiefe und der Hochwassergefährdung können für jedes einzelne Objekt verschiedene Dokumente mit Informationen zu kommunalen und landesweiten Hochwasserschutzmaßnahmen abgerufen werden.

Die Hochwassergefahrenkarten beruhen auf den statistischen Abflüssen für 10, 50 und 100 Jahre sowie für Extremhochwasser (HQ<sub>10</sub>, HQ<sub>50</sub>, HQ<sub>100</sub> und HQ<sub>Extrem</sub>). Die statistischen Abflüsse ermitteln sich anhand der gemessenen Pegel und werden permanent aktualisiert. Für die Zukunft werden aufgrund des zunehmenden Klimawandels stärkere Hochwasser im Bereich der mittleren und extremen Abflusshöhe erwartet (LUBW 18. 10. 2018). Um diesen Einfluss bei baulichen Hochwasserschutzmaßnahmen zu berücksichtigen entwickelte LUBW (2005: 41 ff.) im Rahmen der Kooperation KLIWA den bereits in Kapitel 5.2 erwähnten Lastfall Klimawandel. In diesem Lastfall kann durch einen Klimaänderungsfaktor  $f_{T,x}$  das Bemessungshochwasser in Abhängigkeit der Jährlichkeit T und der Änderungsbereiche an die zunehmende Einwirkung durch den Klimawandel angepasst werden. Die Höhe des Klimaänderungsfaktors hängt dabei wesentlich von der Art des Abflussregimes ab, das in nival und pluvial unterteilt wird. Das Hochwasser im nivalen Abflussregime resultiert hauptsächlich über die Schneeschmelze aus dem Gebirge. Das Hochwasser eines Flusses mit einem pluvialen Abflussregime hingegen erfolgt aufgrund von Starkregenereignissen. Bei Flüssen, die vom nivalen Abflussregime bestimmt werden, wie dem Hochrhein und dem Oberrhein, wird von einer geringen Änderung des HQ<sub>100</sub> ausgegangen. Für Flüsse wie den Neckar oder die Kinzig, die einem pluvialen Abflussregime unterliegen und deren Hochwasser von Starkregenereignissen charakterisiert wird, werden größere Veränderungen erwartet. Der Klimaänderungsfaktor für Baden-Württemberg liegt für ein HQ<sub>100</sub> zwischen 1,15 und 1,25. In der Abbildung 17 sind die Klimaänderungsfaktoren für Baden-Württemberg dargestellt. Auch im Bundesland Bayern wurde bereits 2004 ein pauschaler Zuschlagsfaktor für Hochwasserabflüsse der Jährlichkeiten bis HQ<sub>100</sub> in Höhe von 1,15 eingeführt, der allerdings in begründeten Fällen auch regional modifiziert werden kann (LFU 2005: 2 f.). Auf Bundesebene kann für Hochwasser nach Köppke et al. (2012: 30) der gleiche Klimaänderungsfaktor wie für den Starkregen von 1,2 angesetzt werden. Mit dem Klimaänderungsfaktor tragen die heute errichteten Bauwerke dem zunehmenden Klimawandel Rechnung.

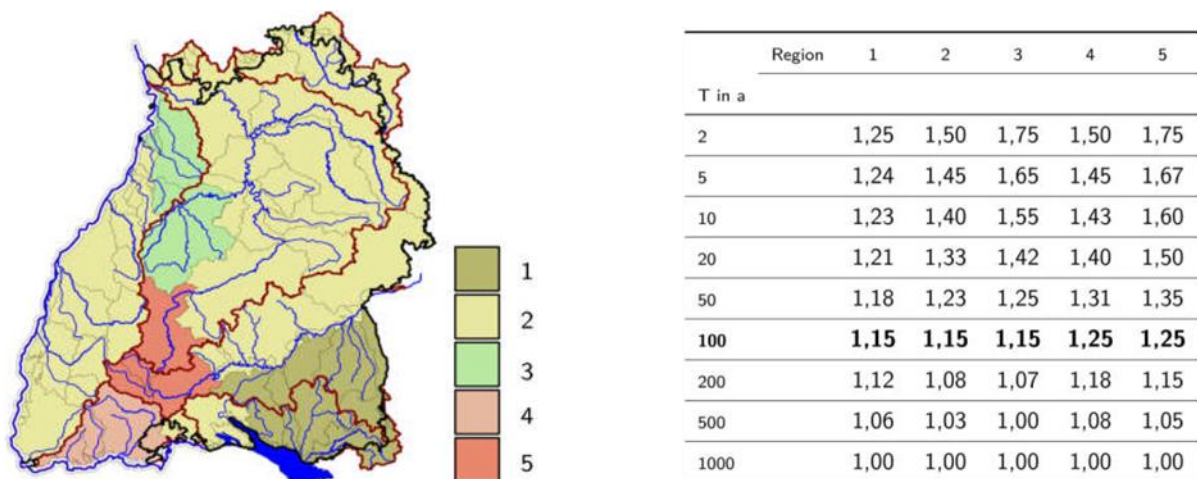


Abbildung 17: Klimaänderungsfaktoren in Baden-Württemberg (LUBW 2005: 44)



#### 5.4. Hagel

Die Entstehung von Hagel geschieht in Gewitterzellen. In Wolken, die sehr viel Wasser gespeichert haben, werden Wassertropfen durch Auf- und Abwinde innerhalb der Wolken in höhere und niedrigere Wolkenschichten transportiert. Diese Wolkenschichten weisen Temperaturen von 0 bis -40° C auf. Die Wassertropfen gefrieren durch Aufwinde in den höheren Schichten zu Eis und nehmen durch Abwinde in den niedrigeren Wolkenschichten Wasserpartikel auf, die durch Aufwinde in höheren Schichten wiederum gefrieren, sodass sich ein Kreislauf ergibt. Je häufiger dieser Kreislauf durchlaufen wird, desto größer werden die Hagelkörner, bis die Aufwinde nicht mehr in der Lage sind, die schwerer gewordenen Hagelkörner in höhere Lagen zu transportieren. Erst dann kommt es zu einem Hagelschauer (Weller et al. 2016: 228). In Deutschland ist ein deutliches Nord-Süd-Gefälle bei der Wahrscheinlichkeit für Hagelschauer erkennbar. Hagelstürme treten in Deutschland vor allem in den Sommermonaten auf. Dabei am häufigsten im Bereich des Alpenvorlandes und der Mittelgebirge. Dies wird anhand der Hagelindexkarte in Abbildung 18 deutlich. Je dunkler die Felder sind, umso größer ist die Hagelgefährdung der Region.



Abbildung 18: Hagelindexkarte für Deutschland (Otto/Busch 2009: 11)

Die aktuelle Hagelgefährdung nimmt in Deutschland von Norden nach Süden zu (Abbildung 18 und Abbildung 19). Besonders gefährdet ist ein Gebiet südlich von Stuttgart. Dieses verläuft vom Ostrand des Schwarzwalds über die Region Stuttgart, Tübingen und Reutlingen, die östlich anschließende Albhochfläche bis nach Ulm. Zudem gibt es einen weiteren Schwerpunkt südlich von Aalen. Auch das Alpenvorland südlich von München inklusive des Raums München ist stark gefährdet. Daneben existieren in Hessen zwei Gebiete mit erhöhter Hagelgefahr. Das eine Gebiet befindet sich östlich des Rothaargebirges bzw. west-südwestlich von Kassel, das andere nordöstlich von Frankfurt im Bereich Wetterau. Ostdeutschland ist insgesamt weniger von Hagel betroffen. Eine Ausnahme stellt das Erzgebirge südwestlich von Dresden dar (Puskeiler 2013: 128 ff.; Punge/Kunz 2016: 163 f.). In der Abbildung 19 ist eine Zusammenstellung über die Hagelhäufigkeit in verschiedenen Ländern Europas gegeben.

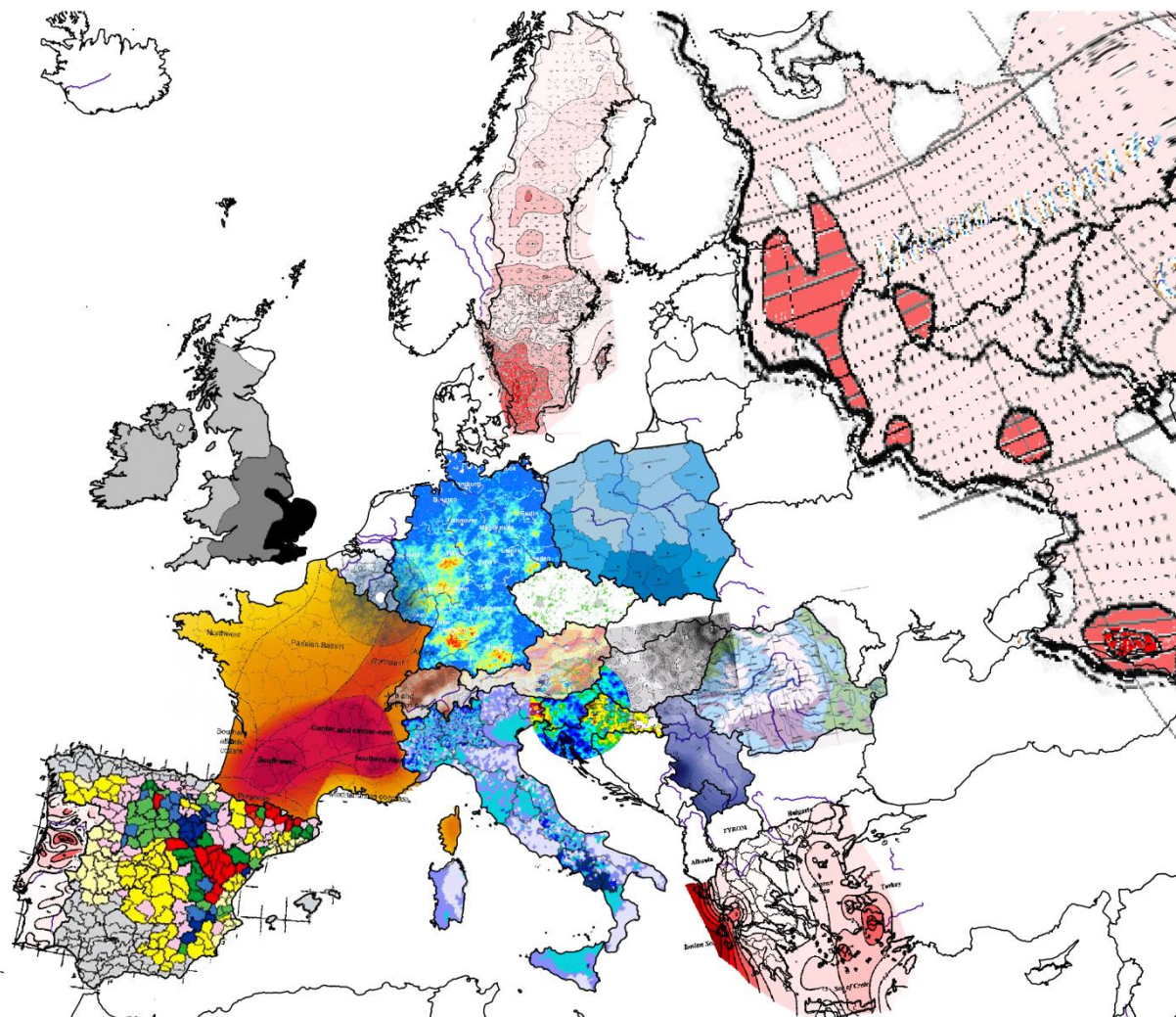


Abbildung 19: Übersicht über die Hagelhäufigkeit in Europa (Punge/Kunz 2016: 164)

Das Ausmaß der durch den Hagel entstehenden Schäden ist dabei i.d.R. abhängig von der Größe des Hagelkornes (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Hagelschaden-Skala – Schadenwirkung von Hagel bei unterschiedlicher Korngröße (Egli 2007: 51)

Intensitäts- klasse	Durchmesser Hagelkom in mm	Schadenbeschreibung
H0	5	Hagelschlag, Größe der Körner wie Erbsen, kein Schaden
H1	5 - 15	Blätter mit Löchern, abgeschlagene Blütenblätter
H2	10 - 20	Blätter von Bäumen und Pflanzen abgeschlagen, Gemüse, Früchte und Getreide mit Druckstellen und Verletzungen, Gemüseblätter zerfetzt
H3	20 - 30	Einige wenige Glasscheiben in Treibhäusern, Glasglocken und/oder Oberlichter zerbrochen; Kerben bei Holzzäunen; Farbe auf Fenstersimsen abgekratzt; Dellen an Wohnwagen; Löcher in Plexiglasdächern; Segeltuch (z.B. Zelte) zerrissen; Getreidehalme gebrochen und Samen zermalmt, Früchte aufgeplatzt/zerschlagen
H4	25 - 40	Einige Fensterscheiben bei Häusern und/oder Windschutzscheiben bei Fahrzeugen geborsten und/oder große Rissbildung. Treibhäuser weitgehend beschädigt, einige Dachpappendächer mit Löchern; Farbschäden an Wänden und Fahrzeugen; weiche Karosserien mitsichtbaren Einschlägen (Beulen); kleine Äste an Bäumen abgeschlagen; ungeschützte Vögel und Geflügel getötet; deutliche Einschläge auf festem Boden.
H5	30 - 50	Einige Schiefer- und Tonziegel zerbrochen, viele Fenster eingeschlagen; Glasziegeldächer und verstärkte Fensterscheiben zerbrochen; sichtbare Dellen an Fahrzeugen im Freien; Außenhülle von Kleinflugzeugen mit Dellen; Risiko von ernsthaften oder tödlichen Verletzungen für Kleintiere; Baumrinde in Streifen aufgerissen; Holzteile mit Dellen und Splitter; große Äste von Bäumen abgerissen
H6	40 - 60	Viele Schieferplatten und Tonziegel (ausgenommen Betonziegel) zerbrochen; Schindel- und Strohdächer aufgerissen. Wellblechdächer und einige Metaldächer mit tiefen Rillen; Sichtmauerwerke leicht beschädigt, hölzerne Fensterrahmen abgebrochen.
H7	50 - 75	Schiefer, Schindel- und viele Ziegeldächer zerstört, Dachsparren sichtbar, Sicht- und Steinmauerwerke mit Abplatzungen; Metallfensterrahmen abgebrochen; Karosserien von Autos und Kleinflugzeugen massiv/irreparabel beschädigt
H8	60 - 90	Betonziegel zersprungen; Metall-, Schiefer-, Schindel- und andere Ziegeldächer zerstört. Trottoirs mit Dellen; Außenhüllen von Großflugzeugen ernsthaft beschädigt, kleine Baumstämme auseinandergerissen, Gefahr von ernsthaften Verletzungen für Leute, die im Freien überrascht wurden
H9	> 80	Betonwände mit Abplatzungen; Betonziegel weitgehend zerbrochen, große Bäume abgebrochen, Lebensgefahr für Leute, die im Freien überrascht wurden
H10	> 100	Backsteinhäuser massiv beschädigt; Lebensgefahr für ungeschützte Personen

Extreme Ereignisse wie der Hagelsturm „Andreas“ im Jahr 2013, der in der Gegend um Reutlingen in Baden-Württemberg mit Hagelkörnern mit einem Durchmesser von 8 - 12 cm einen drastischen wirtschaftlichen Schaden anrichtete, sind jedoch selten. Dieser verursacht aber trotz geringer örtlicher Ausbreitung Schäden wie bei einer großen Naturkatastrophe. Zuvor erzeugte der Hagelsturm vom 12. Juli 1984 im Bereich München den bis dahin größten Schaden durch Hagel in Deutschland mit einer Schadenssumme von 1,5 Mrd. DM (Woppowa/Odenhausen 2014: 2 ff.). Durch den Hagel des Unwetters „Andreas“ wurde ein doppelt so großer Schaden (1,5 Mrd. EUR) verursacht. Schäden treten dabei nicht nur bei Gebäuden und Fahrzeugen sondern auch in der Landwirtschaft auf. Es kommt durch Hagelschäden zu enormen Ernteertragseinbußen in der Landwirtschaft (UBA 2015: 104). Abbildung 20 zeigt, dass die Schadenssummen durch Sturm und Hagel nicht nur von Einzelereignissen abhängen, sondern ein zunehmender Trend in der Schadenssumme ab 1990 erkennbar ist.

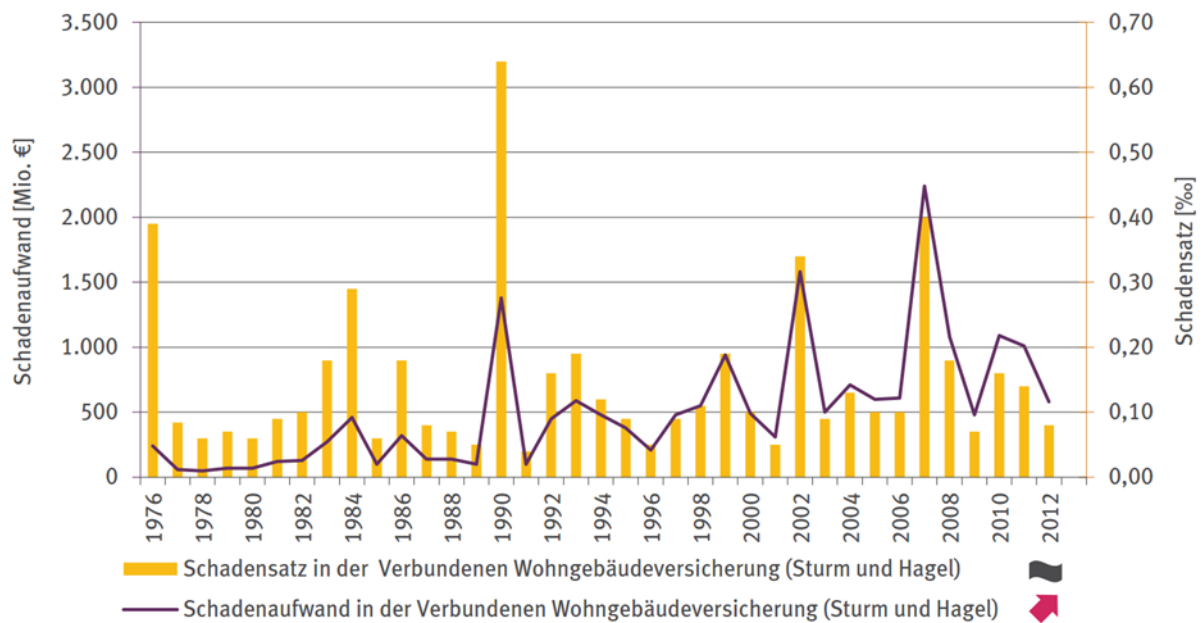


Abbildung 20: Schaden aufwand und Schadensatz in der Verbundenen Wohngebäudeversicherung (UBA 2015: 172)

Aufgrund der derzeitigen Bauweisen (Außendämmung als Wärmedämmverbundsystem, Lichtkuppeln aus Kunststoff, solare Energieversorgungsanlagen mit Photovoltaik und Solarthermie) statt der traditionellen Massivbauweise mit Klinker oder verputzten Mauerwerkswänden kommt es zu steigenden Schadenssummen durch Hagel aufgrund des geringeren Widerstands der sich ändernden Bauweise. Senkrechte Glasfassaden und Fenster sind unter normalen Umständen von Hagel nicht gefährdet. Häufig kommt es aber neben dem Hagel auch zu heftigen Windböen, die den Effekt von Hagel verstärken und hohen Schaden an den senkrechten Fassadenelementen verursachen können (Weller et al. 2016: 228 f.; Woppowa/Odenhausen 2014: 3).

Demnach ist auch zu berücksichtigen wie sich Gewitterstürme im Klimawandel verändern (s. Kapitel 5.5). Untersuchungen in der Schweiz haben eine Zunahme der Hagelschäden ergeben, die nicht nur auf die veränderten Bauweisen sondern auch auf eine Zunahme und Intensivierung der Hagelschauer beruhen (Lateltin/Jordi 2008). Aus 121-jährigen Zeitreihen von Großwetterlagen in der Schweiz konnte analysiert werden, dass die für ein Hagelereignis erforderlichen Wetterbedingungen in den letzten Jahrzehnten angestiegen sind (Egli/Stucki 2007: 8).

Das Karlsruher Institut für Meteorologie und Klimaforschung kommt in seinen Untersuchungen zu den Hagelereignissen in Baden-Württemberg im Zeitraum 1986 bis 2004 zu übereinstimmenden Ergebnissen. Es wurde ein deutlicher Anstieg der Hagelereignisse festgestellt (Kunz/Sander/Kottmeier 2009: 2284). Untersuchungen zu zukünftigen Hagelereignissen sind hingegen weniger aussagekräftig. So reichen beispielsweise bei einem Forschungsvorhaben zum Klimawandel der TU Dresden die Daten zu Hagelschauern in Sachsen nicht aus. Zudem stellt es sich als schwierig heraus, mit den aktuellen groben Verfahren zur Klimasimulation lokale Ereignisse wie Gewitter und daraus nur gegebenenfalls entstehende Hagelschauer aussagekräftig projizieren zu können. Die Entstehungswahrscheinlichkeit von Gewittern kann mit gewissen Unsicherheiten über Konvektionsindizes aus Klimaparametern abgeschätzt werden (ebd.: 2286; Trapp et al. 2007).

Allerdings ist die Abschätzung der zukünftigen Treibhausgasemissionen sowie deren zukünftigen Folgen auf das Klima und letztlich die Entstehung von Hagel aus zukünftig möglichen Gewittern mit zahlreichen Unsicherheiten belegt. All diese Unsicherheiten verhindern eine zuverlässige Aussage zu den zukünftigen Hagelereignissen (Weller et al. 2016: 228). Durch die Zusammenarbeit der deutschen Versicherungswirtschaft mit Klimaforschern, die durch den Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) beauftragt wurde, sind dennoch Aussagen über das zukünftige Schadenspotential infolge Sturm und Hagel in Deutschland möglich. Über die Versicherungsdaten wetterbedingter Schäden, welche über einen langen Zeitraum (1984 - 2008) vorliegen, und Klimamodellen wurden Schadensszenarien für die Zukunft (2011 - 2040 und 2041 - 2070) abgebildet. Demzufolge ist insbesondere in Ostdeutschland im Sommerhalbjahr eine deutliche Zunahme der Schäden durch Sturm und Hagel zu vernehmen, welche bei über 80 % für den Zeitraum 2041 - 2070 liegt. Durchschnittlich ist für ganz Deutschland im Zeitraum 2011 bis 2040 eine Zunahme von 25 % und für 2041 bis 2070 eine Zunahme von 61 % im Sommerhalbjahr projiziert worden (ebd.: 233). Diese Schadensprognose ist nicht nur für Versicherungen sondern vor allem für die Baubranche relevant, da mit entsprechenden Bauweisen das zukünftige klimabedingte Schadenspotential minimiert werden kann.

## 5.5. Sturm

Unter Sturm werden Winde hoher Windgeschwindigkeit verstanden, wie sie bei Tornados, Winter- und Gewitterstürmen erreicht werden. In Deutschland kommt es abhängig von der Gewitterbildung besonders im Sommermonat Juli zu Tornados (Dotzek 2005: 176). Die Gefahr der Tornadobildung wird dabei von Nord-West nach Süd-Ost geringer (Groenemeijer/Kühne 2014: 4780). Abhängig von ihrer höchsten Windgeschwindigkeit werden diese nach der Fujita-Skala oder der TORRO-Skala eingestuft. Die weltweit stärksten Tornados wurden der Klasse F5 (Windgeschwindigkeiten von 420 bis 512 km/h) zugeordnet (Weller et al. 2016: 265). Von den F5- Ereignissen wurden in Deutschland bisher zwei (Juni 1764 und April 1800) und von den F4-Ereignissen bisher elf (seit 1515) registriert (Amstler 2011: 53). Stürme entstehen durch die Temperaturunterschiede vom Äquator zu den Polarregionen, welche zu ansteigenden horizontalen Luftdruckunterschieden bei steigender Höhe führen. Diese Temperaturdifferenzen werden im nordhemisphärischen Herbst und Winter maximal, weshalb in diesem Zeitraum die sogenannten Winterstürme auftreten (Weller et al. 2016: 266). So war der Orkan Kyrill im Januar 2007 das Sturmereignis in Deutschland mit dem größten Schadensaufwand von über 2 Milliarden €. Zuvor gab es neben Kyrill in Deutschland seit dem Jahr 1990 sieben weitere Winterstürme mit beträchtlichen Schadenssummen (u.a. Lothar (1999) und Jeanett (2002)). Die letzten sehr schweren Stürme in Deutschland waren Niklas (2015) und Friederike (2018). Friederike gilt nach Kyrill seit 1997 das zweitheftigste Sturmereignis in Deutschland mit einem Schadensaufwand von 900 Millionen €. Abbildung 21 zeigt die Lokalität von Tornados und schweren Windböen in Europa abhängig von der Jahreszeit im Jahr 2016.

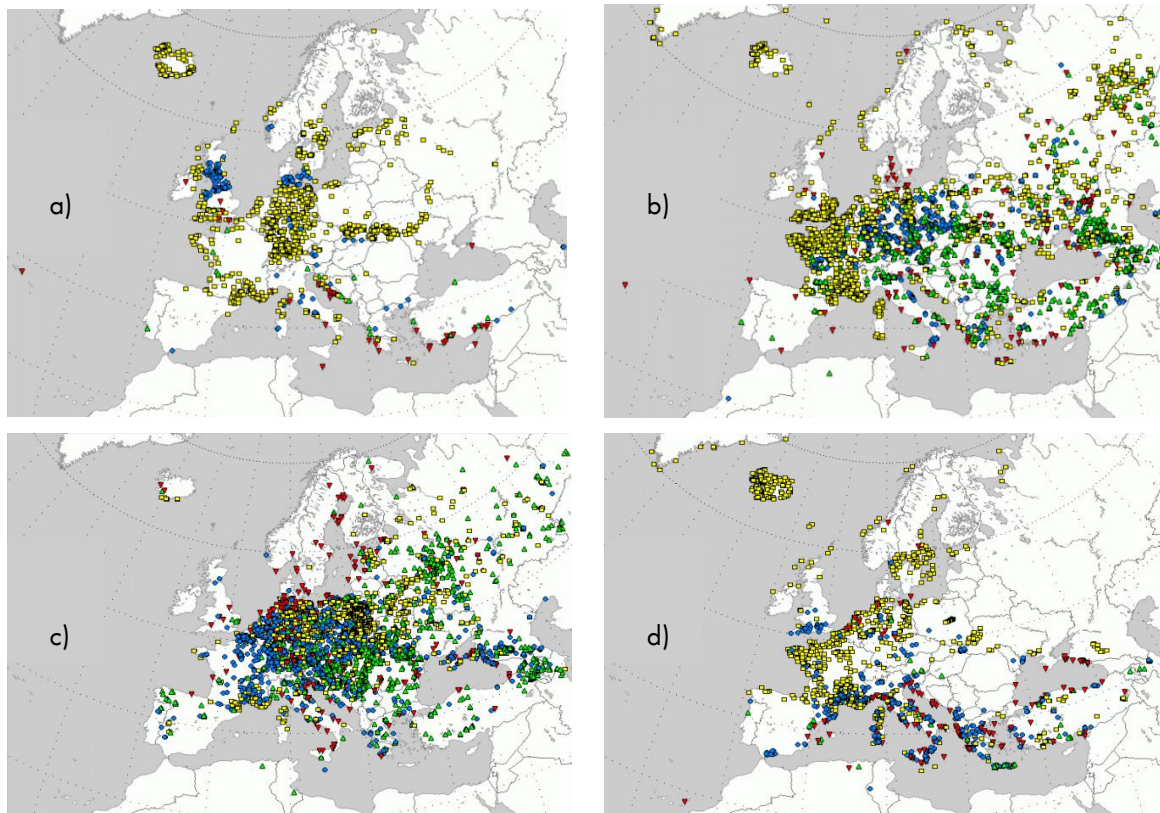


Abbildung 21: Datenbankabfragen in der European Severe Weather Database ESWD für die Phänomene Tornado, Sturm, Hagel und Starkregen für a) Winter 2015/2016, b) Frühling 2016, c) Sommer 2016 und d) Herbst 2016 (rot: Tornado, gelb: Sturm, grün: Hagel, blau: Starkregen) (DWD 2016a: 76)

Unterschiedliche Schadensmodelle zeigen, dass die Windkraft Schäden proportional zur dritten Potenz der stärksten Windgeschwindigkeit verursacht (Klawa/Ulbrich 2003: 728). Eine klimawandelbedingte geringe Erhöhung der Windgeschwindigkeiten bzw. Windintensität würde demnach zu einem exponentiell gesteigerten Schaden mit einer erheblich gesteigerten wirtschaftlichen Schadenssumme führen. Dieses enorme Schadenspotential erfordert eine dringende Beschäftigung mit der Thematik Sturm im Klimawandel. Bauwerke, die heute errichtet werden, haben schließlich Nutzungsdauern von 50 bis 100 Jahren. Eine genaue Datenerfassung für Untersuchungen und Vorhersagen ist allerdings schwierig. Besonders Tornados und Gewitterstürme sind aufgrund ihrer lokalen Vorkommnisse nur schwer zu erfassen. Ein Anstieg der Anzahl registrierter Tornado und Gewitterstürme ab 1990 ist beispielsweise auch durch das gestiegene Interesse und die erhöhte Anzahl der Messstationen begründet. Je nach Veränderung der Umgebungsvegetation (Waldrodung, Bebauung) können sich unterschiedliche gemessene Windstärken an der gleichen Messstation im Laufe der Jahrhunderte ergeben (Weller et al. 2016; Lotze-Campen et al. o.J.).

Alternativ wird sich auf Konvektionsmaße bezogen, welche auf Basis der Größen Druck, Temperatur, Feuchte und Wind auf Schwergewitter begünstigte Entstehungsbedingungen schließen (Sander 2010). Untersuchungen von Marsh/Brooks/Karoly (2009) in denen abhängig von den Umgebungsbedingungen bis zum Ende des 21. Jahrhundert auf die Entstehung von Schwergewittern geschlossen wurde, stellen in den Bereichen Mittel- und Osteuropas nur leichte Anstiege in den Sommermonaten fest. Es bestehen jedoch insgesamt Unsicherheiten in den Prognosen zu Gewitterstürmen (Weller et al. 2016). Die Datenerfassung zu Winterstürmen basiert auf einer homogenen Datengrundlage der in den 1990er Jahren einheitlich in Deutschland installierten Messstationen.

Zurzeit sind in Deutschland 293 Wetterstationen zur stündlichen Messung von Winddaten vorhanden (DWD 2018). Ältere Datenaufzeichnungen sind teilweise heterogen, da in Ost- und Westdeutschland zu unterschiedlichen Zeiten und teilweise auch in unterschiedlichen Intervallen mit der Datenerfassung begonnen wurde. Die aktuell vorhandenen Erfassungen von Winterstürmen in Deutschland sind daher nicht ausreichend um Beobachtungen (Trends) aussagekräftig einordnen zu können (Weller et al. 2016). Festgestellt werden kann jedoch, dass die Sturmaktivität in Nordeuropa zwischen 1960 und 1990 stark anstieg, ab der Mitte der 1990er Jahre wieder abnahm und letztlich um das Jahr 2000 einen Mittelwert erreichte (ebd. 2016; Lotze-Campen et al. o.J.; BMUB 2016a Matulla et al. 2008; Jones et al. 1999) (s. Abbildung 22).

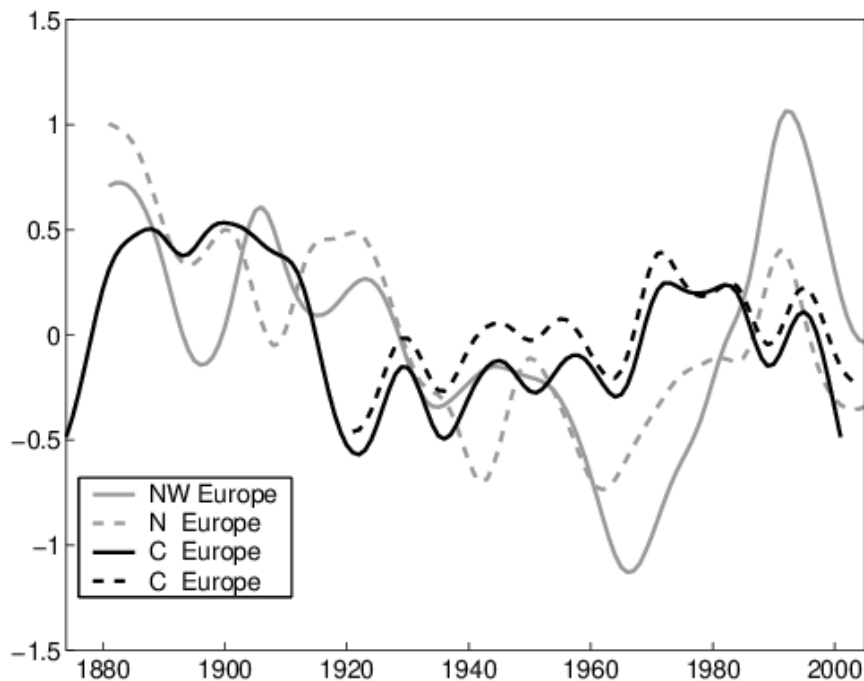


Abbildung 22: Abweichung des 95. Perzentils der geostrophischen Windstärke vom langjährigen Mittel (Matulla et al. 2008)

Insgesamt ist in der Zeit von 1880 bis 2007 in Europa jedoch kein eindeutiger Trend zur Veränderung der Windstärke erkennbar. Es ist demnach zusammenfassend festzuhalten, dass aus den bisher kurzen Langzeitbeobachtungen der Windstärke keine verlässlichen klimabedingten Tendenzen der Sturmentwicklung weder von Gewitter- noch von Winterstürmen ablesbar sind (Weller et al. 2016; Lotze-Campen et al. o.J.). Vielmehr unterliegen die Veränderungen dekadischen Schwankungen, aus denen nach Storch/Meinke/Claussen (2018) keine statistisch signifikanten Langzeitentwicklungen hergeleitet werden kann.

Etliche Zukunftsprojektionen des Klimas in Europa weisen jedoch ein übereinstimmendes geographisches Muster bei der Veränderung der Stürme auf. Dabei nehmen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in einem Bereich vom nördlichen Westeuropa über das nördliche Mitteleuropa bis ins Baltikum die Spitzenwindgeschwindigkeiten im Bezug zum 20. Jahrhundert zu (Pinto et al. 2007; Schwierz et al. 2010). Die größten Verstärkungen ergeben sich demnach im Norden und Westen von Deutschland (Donat et al. 2011). Im Norden und Süden werden diese verstärkten Sturmgebiete von Gebieten geringerer Sturmentwicklung berührt.

In einer Studie von Donat et al. (2011) wurde festgestellt, dass sich der Luftdruckgradient zwischen Süd- und Nordeuropa vergrößert, was zu einer Verstärkung der Stürme führt. Des Weiteren nehmen Windgeschwindigkeiten um etwa 5 % zu. Dies führt zu einer Zunahme der Wintersturmte und deren Intensität in Mitteleuropa in der Prognose für das Ende des 21. Jahrhunderts. Studien von Pinto et al. (2010) kommen zu ähnlichen Ergebnissen, die insbesondere den Anstieg der Anzahl und Stärke der zukünftigen Stürme in Deutschland zum Ende des 21. Jahrhunderts betreffen. Tabelle 5 zeigt die prognostizierte Veränderung des Windes zum Ende des 21. Jahrhunderts für die deutsche Ostseeküste, welche mit den Ergebnissen der Studien von Donat et al. (2011) und Pinto et al. (2010) übereinstimmen.

Tabelle 5: Mögliche Änderungen der Einwirkung Wind an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071 - 2100) im Vergleich zum Zeitraum 1961 - 1990 (Meinke/Weiße/Storch 2011)

Klimaelemente und abgeleitete Größen	Jahresdurchschnitt	Sommer	Winter
Mittlere Windgeschwindigkeit	1 - 4 %	-10 - 2 %	0 - 15 %
Sturmintensität (maximaler Betrag des Windvektors in 10 Meter Höhe)	0 - 4 %	-8 - 2 %	0 - 14 %
Sturmtage (Tage an denen die maximale Windgeschwindigkeit 62 km/h, Beaufort-Skala 8 = stürmischer Wind, überschreitet)	2,2 - 4,6 Tage	-0,3 - 0,6 Tage	0,5 - 3 Tage

Es wird davon ausgegangen, dass in Mitteleuropa vermehrt mit Winterstürmen (Parry et al. 2007) und auch mit einer höheren Häufigkeit und Intensität von Sommerstürmen zu rechnen ist (Lotze-Campen et al. o.J.). Nachfolgend ist die bisherige Windzonenkarte mit der zugehörigen Tabelle der Windzonenklassen für Deutschland, welche als Grundlage für die Einwirkungsbemessung in der Tragwerksplanung von Gebäuden dient, abgebildet (s. Abbildung 23 und Tabelle 6).

Die durch den Klimawandel zunehmenden Extremwetterereignisse werden in der Windzonenkarte nicht erfasst. Dies ist in Anbetracht des beträchtlichen Schadenpotentials und der zuvor genannten Prognosen von Sturmereignissen zu überdenken. Die Tragwerke im Bauwesen werden i. d. R. nach der DIN EN 1991-1-4:2010-12 auf die Einwirkungen von Sturmereignissen mit einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren ausgelegt. Bei einer Analyse von Della-Marta/Pinto (2009) über die Veränderung der Wiederkehrperiode von Sturmereignissen zwischen 1960 und 2000 und der zukünftigen im Zeitraum 2060 bis 2100 wird u. a. in Bereichen der Nordsee und Westeuropa eine deutliche Verkürzung der Wiederkehrintervalle vernommen. Die Studie kommt schließlich zu der Aussage, dass Stürme, die im Zeitraum 1960 bis 2000 noch eine Wiederkehrperiode von 50 bzw. 20 Jahren zeigten, sich in dem Zeitraum 2060 bis 2100 durchschnittlich alle 9 bzw. 5,5 Jahre ereignen werden. Jedoch sei für eine verlässliche Aussage der Studie eine größere Datenmenge an Klimamodellen erforderlich.





Abbildung 23: Windzone in Deutschland in Anlehnung an DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12

Tabelle 6: Windzonen mit zugehörigen Basiswindgeschwindigkeiten und Basisgeschwindigkeitsdrücken nach DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12

Windzone	Basiswindgeschwindigkeit	Basisgeschwindigkeitsdruck
	$v_b$ in m/s	$q_b$ in kN/m <sup>2</sup>
1	22,5	0,32
2	25,0	0,39
3	27,5	0,47
4	30,0	0,56

Die Abbildung 24, welche auf Datengrundlage einer Untersuchung von Rauthe/Kunz/Kottmeier (2010) zu der Veränderung der winterlichen Böenextrema in Deutschland für den Projektionszeitraum 2021 bis 2050 beruht, zeigt, dass besonders in Nordwestdeutschland im Vergleich zu dem Zeitraum 1971 bis 2000 eine deutliche Zunahme auftritt. Ein Anstieg von bis zu 6 % der stärksten Böenextrema eines zehnjährlichen Ereignisses wird demnach erwartet. Nur in den Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg wird eine Abnahme der Böengeschwindigkeit prognostiziert (Weller et al. 2016).

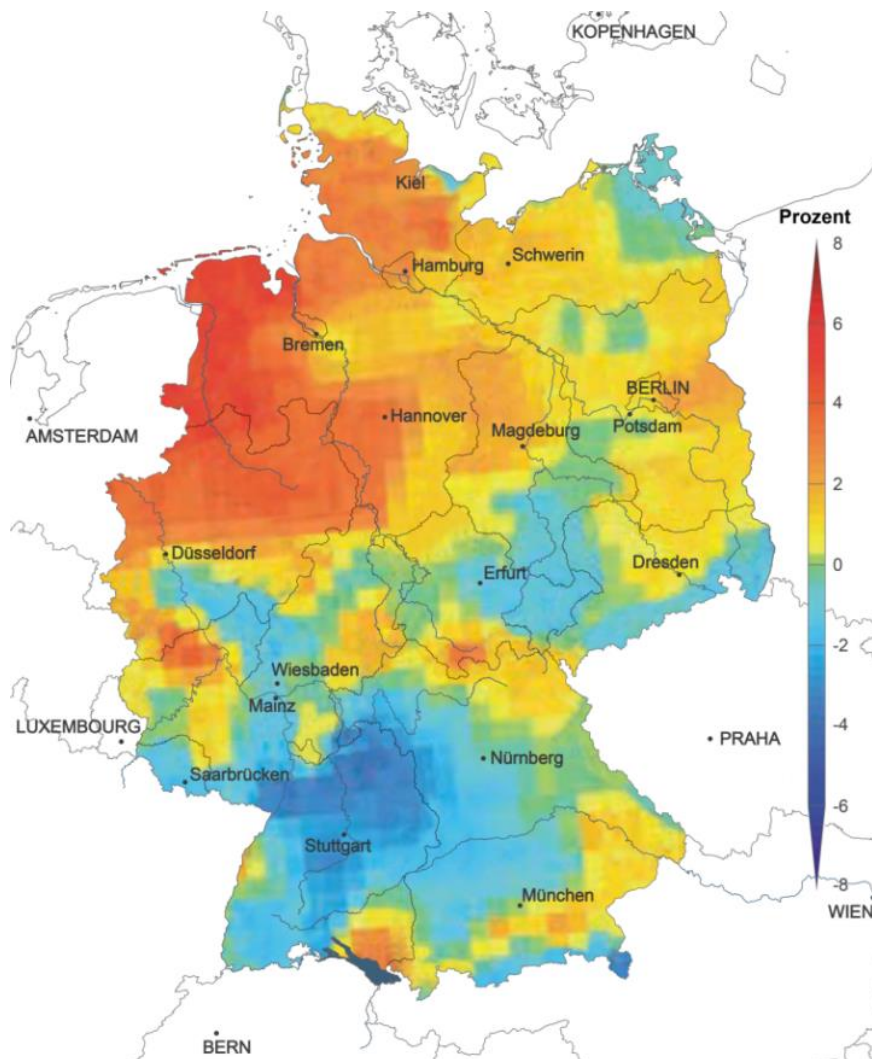


Abbildung 24: Relative Veränderung der Böenextrema für eine zehnjährliche Wiederkehrperiode (Weller et al. 2016)

Es ist zu bedenken, dass bereits geringe Veränderungen in der Sturmaktivität wirtschaftlich Einfluss von hoher Bedeutung haben. Drei der von Weller et al. (2016) betrachteten Untersuchungen weisen alle, begründet durch den Klimawandel, auf einen ähnlichen Anstieg der Sturmschäden hin (Pinto et al. 2007; Schwierz et al. 2010; Donat et al. 2011). Unter Annahme von zwei Emissionsszenarien (SRES - Emissionsszenario A1B und A2) steigen die versicherten Schäden an Gebäuden in Deutschland bis zum 21. Jahrhundert um 40 % bzw. 49 % (Pinto et al. 2007). Dies wird in erster Linie durch eine Abnahme der Wiederkehrperiode starker Stürme, aber auch durch eine Zunahme außergewöhnlich starker Stürme gegen Ende des 21. Jahrhunderts begründet. Storch/Meinke/Claussen (2018) stellen allerdings fest, dass zur künftigen Entwicklung von Sturmereignissen in der Metropolregion Hamburg keine robusten Aussagen getroffen werden können. Je nach Gebiet kann es sowohl zu einer Zunahme als auch zu einer Abnahme der Windgeschwindigkeiten bei Sturmereignissen kommen. LUBW (2013) untersuchten die zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg. Aus den Untersuchungen folgte, dass sich die mittlere Windgeschwindigkeit in Baden-Württemberg zur Zukunft hin nicht ändert. Auch für die maximale mittlere Windgeschwindigkeit konnten kaum Änderungen simuliert werden. Hübener (2017) konnten nur geringfügige Änderungen der Änderungssignale für den bodennahen Wind im Frühjahr, Sommer und Herbst feststellen. Im Winter konnte jedoch eine leichte Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit simuliert werden.

## 6. Definition der Expositionsklassen

### 6.1. Sommerhitze

Um die Exposition von Gebäuden besser abschätzen zu können, müssen in einem ersten Schritt Expositionsklassen definiert werden. Zur Bestimmung der Expositionsklassen wird eine thermische Gebäudesimulation der Musterliegenschaft mit verschiedenen Klimadatensätzen durchgeführt. Anhand der ausgewerteten Ergebnisse können Datensätze für eine niedrige, eine mittlere und eine hohe Expositionsklasse festgelegt werden. Im Vorgängerbericht der Firma INTEP wurden für die Einwirkung Sommerhitze folgende Expositionsklassen festgesetzt: Die Expositionsklasse 1 geht von einer Tagesmitteltemperatur über 25 °C und/oder einer Tageshöchsttemperatur 30 °C an einem Tag aus. Für die Expositionsklasse 2 beträgt an zwei Tagen in Folge die Tagesmitteltemperatur über 25 °C beziehungsweise die Tageshöchsttemperatur mindestens 30 °C. Die Expositionsklasse 3 charakterisiert sich durch eine Höchsttemperatur von über 30 °C an fünf aufeinanderfolgenden Tagen. Weiterhin sind die Sommernächte windschwach und die Temperatur sinkt nicht unter 20 °C. An dieser Stelle scheint eine Anpassung der Expositionsklassen nach oben erforderlich, um die Resilienz gegenüber der Einwirkung Sommerhitze auch im Hinblick auf erwartete Klimaveränderungen zu stärken.

Um die Veränderung des Klimas und dessen Auswirkungen auf Überhitzung in Gebäuden zu quantifizieren wurde die Musterliegenschaft in einer Software für thermisch-dynamisch Simulation modelliert. Geometrie und Bauteilaufbauten wurden von der ursprünglichen Planung übernommen. Für die Verglasungsaufbauten wurden Annahmen getroffen. Für weitere Randbedingungen, wie interne Wärmelasten, technische Gebäudeausrüstung oder Sonnenschutzsteuerung wurde die für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes maßgebliche Norm DIN 4108-2:2013-02 herangezogen. In Kapitel 6.1.1 werden angeetzte Randbedingungen detailliert erklärt. Während die Norm für die jeweilige Klimaregion einen Wetterdatensatz vorschreibt (siehe Kapitel 6.1.2), wurden verschiedene Wetterdatensätze in das Modell integriert und auf ihre Auswirkung auf die Überhitzung des Gebäudes untersucht und verglichen. Alle sonstigen aufgeführten Randbedingungen bleiben konstant. Für die Standorte Potsdam und Mannheim wurden Klimadatensätze aus dem Testreferenzjahr-Datensatz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) von 2011 (TRY 2011) in der Version 1.1 und aus dem Testreferenzjahr-Datensatz von 2017 (TRY 2017) untersucht. Beide Datensätze enthalten jeweils Klimadaten für ein extremes sommer-fokussiertes und ein durchschnittliches Normaljahr. Weiter wird zwischen gegenwärtigen und zukünftigen Testreferenzjahren unterschieden. Zusätzlich wurden für den Standort Potsdam, jeweils für die Jahre 2050 und 2100, Klimadatensätze in der Software Meteonorm generiert, welche die Emissionsszenarios A1B und A2 des IPCC berücksichtigen.

#### 6.1.1. Simulationsumgebung

Für die dynamisch-thermischen Simulationsrechnungen wird die Software IDA ICE 4.8 verwendet. Die Software ist nach mehreren international anerkannten Qualitätsrichtlinien validiert, unter anderem nach ANSI/ASHRAE 140-2004 und DIN EN ISO 15265:2004-11.

#### 6.1.2. Anforderungen und Randbedingungen nach DIN 4108-2:2013-02

##### Allgemeines

Die nach DIN 4108-2:2013-02 definierten Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz und die zu verwendenden Randbedingungen variieren in Abhängigkeit der Nutzungsart des Gebäudes und seines Standortes. In einem Wohngebäude dürfen während der Nutzungszeit 24 h/d nicht mehr als 1200 Über-temperaturgradstunden auftreten (Tabelle 7). Übertemperaturgradstunden berücksichtigen sowohl die Höhe, als auch die Dauer einer Überschreitung des Bezugswerts der Innentemperatur.

Der Bezugswert der Innentemperatur ist, ebenso wie der zu verwendende Klimadatensatz, von der Sommerklimaregion abhängig. Deutschland wird in drei Sommerklimaregionen unterteilt (Abbildung 25). Die Auswahl der Klimaregion als Klimarandbedingungen steht in Abhängigkeit des Standorts des Gebäudes. Dazu werden für die Berechnungen die folgenden vom BBSR zur Verfügung gestellten Testreferenzjahre (TRY) aus 2011 zu Grund gelegt:

- Klimaregion A: Normaljahr, TRY-Zone 2 (Rostock),
- Klimaregion B: Normaljahr, TRY-Zone 4 (Potsdam),
- Klimaregion C: Normaljahr, TRY-Zone 12 (Mannheim).

Tabelle 7: Anforderungswert in Abhängigkeit der Sommerklimaregion und der Nutzungsart

Sommerklimaregion	Bezugswert $\theta_{b,op}$ der Innentemperatur in °C	Anforderungswert Übertemperaturgradstunden In Kh/a	
		Wohngebäude	Nichtwohngebäude
A	25		
B	26	1200	500
C	27		

Hinweis: Bezugnehmend auf eine Temperaturgrenze von 26 °C entspricht eine Stunde mit 27 °C 1 Kh. Eine Stunde mit 28 °C oder zwei Stunden mit 27 °C entsprechen 2 Kh usw.

### Nutzungen/Nutzungszeiten

Wohngebäude: 24 h/d

### Beginn der Simulationsrechnungen und Zeitraum für die Auswertung

Die Berechnungen sind für ein komplettes Jahr durchzuführen und beginnen am 1. Januar an einem Montag um 0:00 Uhr. Sowohl für Wohn- als auch für Nichtwohngebäude sind keine Feiertage und Ferienzeiten bei der Ermittlung des Übertemperaturgradstundenwertes zu berücksichtigen.

### Interne Wärmeeinträge

Der mittlere interne Wärmeeintrag ist bezogen auf die jeweils betrachtete Nettogrundfläche für

Wohngebäude: 100 Wh/(m<sup>2</sup>d)

Die als Tageswerte angegebenen Wärmeeinträge sind für die Berechnungen als konstante Wärmeeinträge während der in Nutzungen/Nutzungszeiten angegebenen Nutzungszeiten anzusetzen. Die Wärmeeinträge werden zu 100 % als konvektive Wärmeeinträge behandelt.

### Soll-Raumtemperatur für Heizzwecke (ohne Nachtabsenkung)

Wohngebäude  $\theta_{h,soll} \geq 20$  °C

### Grundluftwechsel

Wohngebäude:  $n = 0,5$  1/h

Der ermittelte Luftwechsel ist im Tagesgang konstant anzusetzen, wenn weder die Bedingungen für erhöhte Taglüftung noch die Bedingungen für erhöhte Nachtlüftung nicht erfüllt sind.

## Erhöhter Tagluftwechsel

Überschreitet die Raumlufttemperatur 23 °C und liegt die Raumlufttemperatur über der Außenlufttemperatur, darf der mittlere Luftwechsel während der Aufenthaltszeit (Wohngebäude 6:00 Uhr bis 23:00 Uhr) bis auf  $n = 3 \text{ 1/h}$  erhöht werden, um durch erhöhte Lüftung eine Überhitzung des Raumes zu vermeiden.

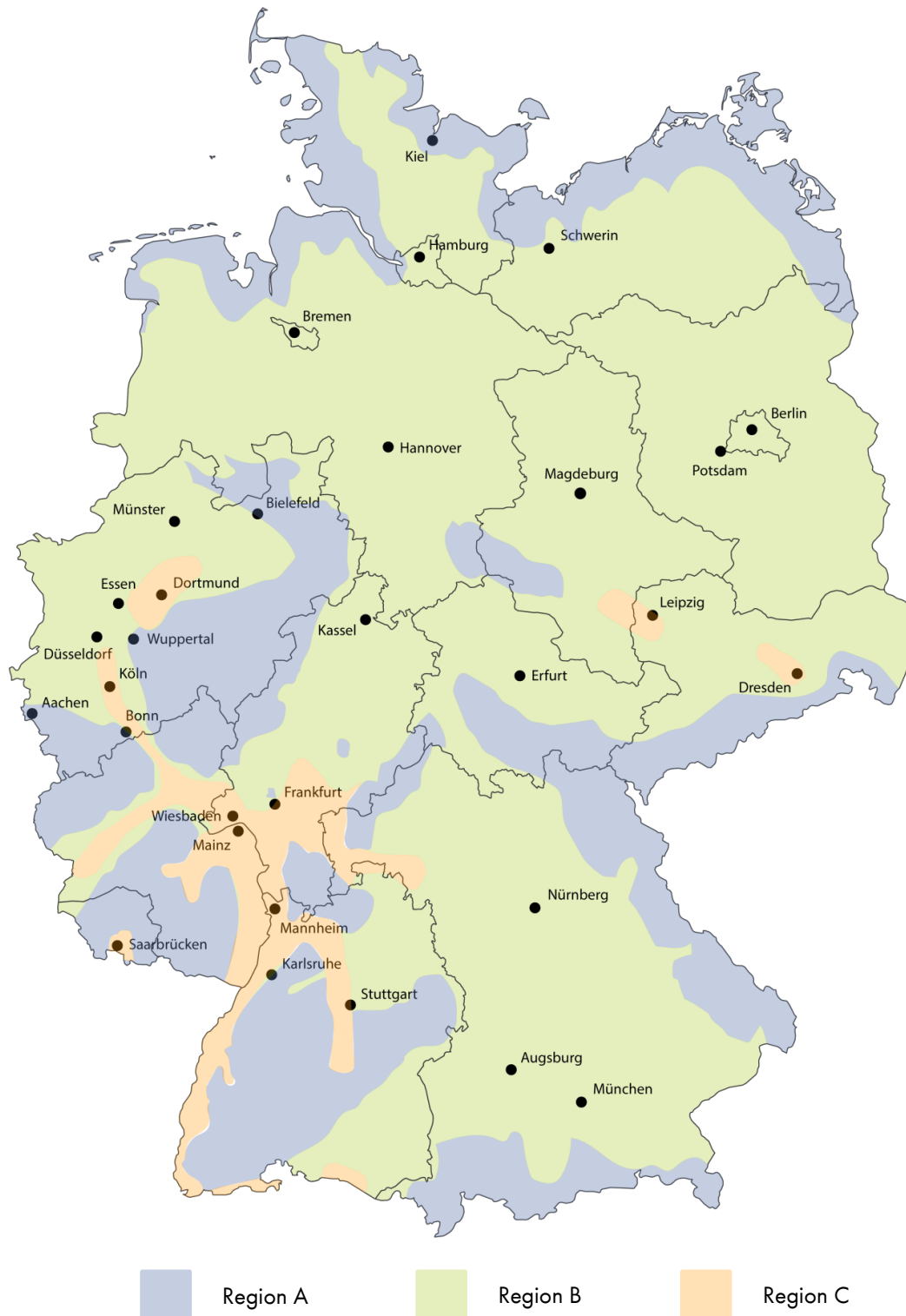


Abbildung 25: Übersicht Sommerklimaregionen in Deutschland in Anlehnung an DIN 4108-2:2013-02

## Nachluftwechsel

Außerhalb der Aufenthaltszeit (Wohngebäude 23:00 Uhr bis 06:00 Uhr)

- ist von dem Luftwechsel nach Grundluftwechsel auszugehen, wenn nicht die Möglichkeit zur Nachlüftung besteht.
- darf der Luftwechsel auf  $n = 2$  1/h erhöht werden (erhöhte Nachlüftung), wenn die Möglichkeit zur nächtlichen Fensterlüftung besteht.

Bei der Wohnnutzung darf in der Regel von der Möglichkeit zu erhöhter Nachlüftung ausgegangen werden, wenn im zu bewertenden Raum oder Raumbereich die Möglichkeit zur nächtlichen Fensterlüftung besteht

- darf der Luftwechsel auf  $n = 5$  1/h erhöht werden (hohe Nachlüftung), wenn für den zu bewertenden Raum oder Raumbereich die Möglichkeit besteht, geschossübergreifende Lüftungsmöglichkeiten (z. B. Lüftung über angeschlossenes Atrium) zu nutzen, um den sich einstellenden Luftwechsel zu erhöhen;
- darf der erhöhte Nachluftwechsel gemäß der Dimensionierung der Anlage bei Einsatz einer Lüftungsanlage angesetzt werden.

Für den Ansatz eines erhöhten oder hohen Nachluftwechsels oder eines Nachluftwechsels gemäß der Dimensionierung der Lüftungsanlage müssen die im Folgenden genannten Temperaturrendbedingungen gegeben sein:

Die Innenlufttemperatur muss immer über der Raum-Solltemperatur für Heizzwecke (Wohngebäude 20 °C) liegen. Die Innenlufttemperatur muss über der Außenlufttemperatur liegen.

## Steuerung Sonnenschutz

Es wird von einem nicht automatisch gesteuerten Sonnenschutz auf allen Fassadenseiten ausgegangen. Da für die Wohnnutzung 100 % Nutzungszeit hinterlegt sind, unterscheiden sich bei Wohngebäuden in der Berechnung automatische und manuelle Steuerung nicht.

Sind zur geplanten Betriebsweise einer Sonnenschutzvorrichtung keine Steuer- bzw. Regelparameter bekannt, so ist im Fall einer automatischen Sonnenschutzsteuerung für die Berechnungen von einer strahlungsabhängigen Steuerung für nord-, nordost- und nordwestorientierte Fenster mit einer Grenzbestrahlungsstärke von 200 W/m<sup>2</sup> (Wohngebäude) und für alle anderen Orientierungen mit einer Grenzbestrahlungsstärke von 300 W/m<sup>2</sup> (Wohngebäude) (Summe aus Direkt- und Diffusstrahlung, außen vor dem Fenster) pro Quadratmeter Fensterfläche auszugehen.

## Wärmeübergangswiderstände

Die Wärmeübergangswiderstände dürfen, wie für den Winterfall, konstant nach DIN EN ISO 6946:2018-03 (Tabelle 1) angesetzt werden.

## Bauliche Verschattung

Hier nicht berücksichtigt.

## Passive Kühlung

Hier nicht berücksichtigt.

### 6.1.3. Planungsgrundlagen

Die folgenden Angaben und Planstände liegen den Simulationen zugrunde:

- Grundrisse und Schnitte aus dem Plan der Musterliegenschaft (s. Abbildung 2 bis Abbildung 5).

#### Angenommene Bauteilaufbauten

Im Folgenden werden die für die Simulation angenommenen Bauteilaufbauten aufgezeigt (Tabelle 8 bis Tabelle 14). Die Bauteilaufbauten sind ebenso im Schnitt in der Abbildung 5 aufgezeigt. Für die Simulation wurde bereits der Gipsputz durch einen Kalk-Zement-Putz ersetzt.

Tabelle 8: Bauteilaufbau Innenwände für Simulation

Kal	Dicke in m	Material aus Datenbank
Kalk-Zement-Putz	0,015	1.1.1 Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement und hydraulischem Kalk
Kalksandstein	0,175	4.2 Kalksandsteine mit 1800 kg/m <sup>3</sup>
Kalkzement-Putz	0,015	1.1.1 Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement und hydraulischem Kalk

Tabelle 9: Bauteilaufbau Außenwände für Simulation

Bauteilschicht	Dicke in m	Material aus Datenbank
Kalk-Zement-Putz	0,015	1.1.1 Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement und hydraulischem Kalk
Kalksandstein	0,200	4.2 Kalksandsteine mit 1800 kg/m <sup>3</sup>
WDVS	0,180	5.3 Extrudierter Polystyrolschaum (XPS) Kategorie I mit 30 kg/m <sup>3</sup> ; 0,031 W/(mK)
Kalkzement-Putz	0,015	1.1.1 Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement und hydraulischem Kalk

Tabelle 10: Bauteilaufbau Erdberührte Außenwand für Simulation

Bauteilschicht	Dicke in m	Material aus Datenbank
Kalk-Zement-Putz	0,015	1.1.1 Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement und hydraulischem Kalk
Stahlbeton	0,2	Beton armiert (mit 2 % Stahl)
Perimeterdämmung	0,18	5.3 Extrudierter Polystyrolschaum (XPS) Kategorie I mit 30 kg/m <sup>3</sup> ; 0,035 W/(mK)

Tabelle 11: Bauteilaufbau Erdgeschoss Decke für Simulation

Bauteilschicht (von oben nach unten)	Dicke in m	Material aus Datenbank
Parkett	0,02	Sperrholz (DIN EN 12524) mit 700 kg/m <sup>3</sup>
Estrich	0,06	1.3.2 Zement-Estrich
Trittschalldämmung	0,03	5.2 Expandierter Polystyrolschaum (EPS) Kategorie II mit 20 kg/m <sup>3</sup> ; 0,045 W/(mK)
Wärmedämmung	0,06	5.3 Extrudierter Polystyrolschaum (XPS) Kategorie II mit 30 kg/m <sup>3</sup> ; 0,04 W/(mK)
Stahlbetonrohdecke	0,2	Beton armiert (mit 2 % Stahl) (DIN EN 12524)
Luftschicht abgehängte Decke	0,2	Luft in 95 mm vert. Luftspalt
Gipskarton	0,025	Gipskartonplatten (DIN EN 12524)

Tabelle 12: Bauteilaufbau Kellerdecke für Simulation

Bauteilschicht (von oben nach unten)	Dicke in m	Material aus Datenbank
Parkett	0,02	Sperrholz (DIN EN 12524) mit 700 kg/m <sup>3</sup>
Estrich	0,06	1.3.2 Zement-Estrich
Trittschalldämmung	0,03	5.2 Expandierter Polystyrolschaum (EPS) Kategorie II mit 20 kg/m <sup>3</sup> ; 0,045 W/(mK)
Wärmedämmung	0,06	5.3 Extrudierter Polystyrolschaum (XPS) Kategorie II mit 30 kg/m <sup>3</sup> ; 0,04 W/(mK)
Stahlbetonrohdecke	0,2	Beton armiert (mit 2 % Stahl) (DIN EN 12524)
Kalk-Zementputz	0,015	1.1.1 Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement und hydraulischem Kalk



Tabelle 13: Bauteilaufbau Boden gegen Erdreich für Simulation

Bauteilschicht (von oben nach unten)	Dicke in m	Material aus Datenbank
Parkett	0,02	Sperrholz (DIN EN 12524) mit 700 kg/m <sup>3</sup>
Estrich	0,06	1.3.2 Zement-Estrich
Trittschalldämmung	0,03	5.2 Expandierter Polystyrolschaum (EPS) Kategorie II mit 20 kg/m <sup>3</sup> ; 0,045 W/(mK)
Wärmedämmung	0,06	5.3 Extrudierter Polystyrolschaum (XPS) Kategorie II mit 30 kg/m <sup>3</sup> ; 0,035 W/(mK)
Stahlbetonrohdecke	0,2	Beton armiert (mit 2 % Stahl) (DIN EN 12524)
Perimeterdämmung	0,12	5.3 Extrudierter Polystyrolschaum (XPS) Kategorie II mit 30 kg/m <sup>3</sup> ; 0,035 W/(mK)

Tabelle 14: Bauteilaufbau Dach für Simulation

Bauteilschicht (von oben nach unten)	Dicke in m	Material aus Datenbank
Kies	0,1	Kies
Wärmedämmung	0,2	5.3 Extrudierter Polystyrolschaum (XPS) Kategorie II mit 30 kg/m <sup>3</sup> ; 0,032 W/(mK)
Stahlbetonrohdecke	0,2	Beton armiert (mit 2 % Stahl) (DIN EN 12524)
Kalk-Zement-Putz	0,015	1.1.1 Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement und hydraulischem Kalk

### Verglasungseigenschaften

Die Verglasung ist für alle Fenster gleich. Der Rahmenanteil beträgt 20 % mit einem U-Wert von 2,0 W/(m<sup>2</sup>K), sodass sich bei einem U-Wert von 0,7 W/(m<sup>2</sup>K) im Sommer für die Verglasung ein resultierender U<sub>w</sub>-Wert von 0,9375 W/(m<sup>2</sup>K) für das Gesamtfenster einstellt. Da die thermisch-dynamische Gebäudesimulationssoftware die strahlungsphysikalischen und thermischen Eigenschaften von Verglasungen nach ISO 15099:2003-11 berechnet, wurden diese mit Hilfe der Software WinSLT nach ebd. bestimmt und entsprechend in IDA ICE händisch eingegeben. Die Ergebnisse der WinSLT-Berechnung nach ebd. sind in Abbildung 26 dargestellt.

### Sonnenschutz

Es wurde angenommen, dass alle Fenster mit einer außenliegenden Jalousie ausgestattet sind. Dieser wurde mit einem F<sub>c</sub>-Wert von 0,14 angesetzt. In Kombination mit der verwendeten Verglasung ist dies ein gängiger Wert für handelsübliche Außenjalousien.

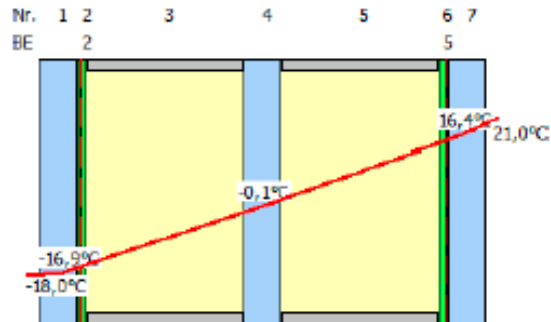
## Berechnung SommerGlobal Musterliegenschaft

**Bauvorhaben: KLIBAU**

**Position: Interpane iplus LS 4-16-4-16-4**

**Schichtaufbau (von außen nach innen)**

Nummer	BE	Bezeichnung	mm
1		Planibel Clearlite	4,00
2	2	iplus LS (en=8%)	16,00
3		90% Argon	4,00
4		Planibel Clear	16,00
5		90% Argon	4,00
6	5	iplus LS (en=8%)	16,00
7		Planibel Clearlite	4,00
			44,00



Rw (C;Ctr) dB = npd

**Transmission, Reflexion, Absorption ASHRAE**

$\rho_v = 0,17$  (Lichtreflexionsgrad außen)

$T_v = 0,74$  (Lichttransmissionsgrad)

$\rho'_v = 0,17$  (Lichtreflexionsgrad innen)

$T_s = 0,52$  (direkter Strahlungstransmissionsgrad)

$\rho_s = 0,30$  (direkter Strahlungsreflexionsgrad aussen)

$\rho'_s = 0,30$  (direkter Strahlungsreflexionsgrad innen)

$\alpha_s \quad 1 = 0,08; 3 = 0,07; 5 = 0,04$  (direkter Strahlungsabsorptionsgrad)

**ASHRAE**

SC = 0,68 (Shading Coefficient, g/0,87)

SHGC = 0,59 (Gesamtenergiedurchlassgrad)

Einbauwinkel = 90° vertikal

$U_g = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K} \quad 0,14 \text{ Btu/h ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$  (Winter)

Systemhöhe = 1,50 m

$U_g = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K} \quad 0,13 \text{ Btu/h ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$  (Sommer)

**Randbedingung**

ASHRAE Sommer (SHGC)

$T_e$  (°C)

$T_i$  (°C)

$E_s$  (W/m<sup>2</sup>)

$h_{c,e}$  (W/m<sup>2</sup>K)

$h_{c,i}$  (W/m<sup>2</sup>K)

ASHRAE Winter (Ug)

-18,0

21,00

0,00

15,00

2,19

ASHRAE Winter (Temperaturen)

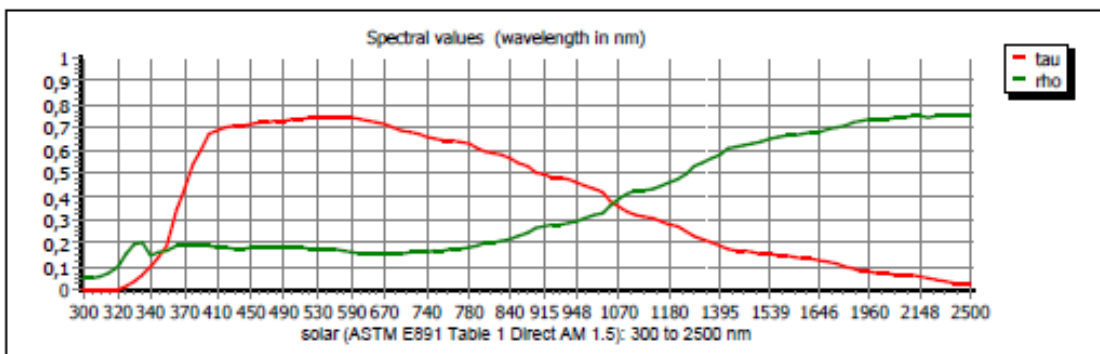
-18,0

21,00

0,00

26,00

1,92



Schwankungen der licht- und strahlungstechnischen Werte wegen chemischer Zusammensetzung von Glas und Herstellprozesses möglich. Funktionswerte berücksichtigen die zugelassenen Toleranzen entsprechend der Produktnormen. Das Rechenergebnis gibt keine Auskunft über die technische Ausführbarkeit des Aufbaus.

Wir weisen darauf hin, daß die Berechnungen auf Grundlage von Spektraldaten der Hersteller erstellt wurden. Die Firma Sommer Informatik GmbH übernimmt keine Haftung sowohl für die Vollständigkeit als auch für die Richtigkeit der Herstellerdaten. Für die Leistungserklärung sind die zur Verfügung gestellten Herstellerdaten gesondert zu bestätigen.

ISO 15099, NFRC 100, NFRC 101, ASTM E891 Table 1 Direct AM 1.5

ift-zertifiziert lt. Validierungsbericht Nr. 410 42167 (Stand 11/2009)

Registriert für: Werner Sobek Stuttgart AG - Werner Sobek Stuttgart GmbH

SommerGlobal 7.1101

Copyright Sommer Informatik GmbH, Rosenheim

ADMIN 19.11.2018 - 16:05:13

1 / 1

Abbildung 26: Ergebnisse der WinSLT-Berechnung nach ISO 15099:2003-11

## Geometrie und Simulationsmodell

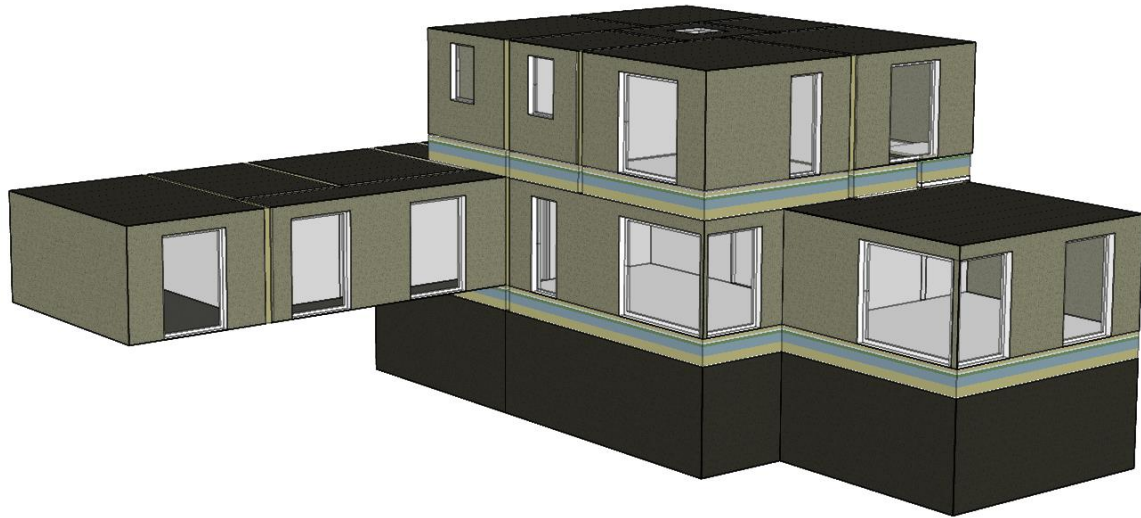


Abbildung 27: Simulationsmodell für IDA ICE

### Klimadaten für die Berechnungen

Wie eingangs erwähnt, wurden verschiedene Wetterdatensätze verwendet. Im Folgenden werden diese kurz erklärt und anschließend hinsichtlich klimatologischer Kenntnisse ausgewertet.

Für das TRY 2011 wurde die Bundesrepublik in 15 Klimaregionen unterteilt und Repräsentanzstationen zugeordnet, deren Klimadaten jeweils repräsentativ für die jeweilige Region sind. Basierend auf Mess- und Beobachtungsreihen wurden dann Testreferenzjahre für die Gegenwart und mit Hilfe von regionalen Klimamodellen für die Zukunft entwickelt. In den Datensätzen der TRY 2017 hingegen ist es möglich ortsgenaue Klimadaten mit einer räumlichen Auflösung von 1 km<sup>2</sup> zu verwenden. Diese beinhalten lokale Klimaphänomene wie Stadteffekte und die Höhenabhängigkeit diverser Parameter, die in der früheren Version noch manuelles Bearbeiten des Datensatzes notwendig gemacht haben.

Die ausgewählten Repräsentanzstandorte sind Potsdam (TRY-Region 4) und Mannheim (TRY Region 12). Im nächsten Schritt wurden die Koordinaten der Messstationen der TRY 2011 bestimmt und anschließend ortsgenau die Datensätze der TRY 2017 für den zugehörigen Teil des 1 km<sup>2</sup> - Rasters generiert. Zusätzlich wurden für den Standort Potsdam, jeweils für die Jahre 2050 und 2100, Klimadatensätze in der Software Meteonorm generiert, welche die Emissionsszenarien A1B und A2 des IPCC berücksichtigen. Zusammenfassend wurden folgende Wetterdaten untersucht (s. Tabelle 15):

Tabelle 15: Untersuchte Wetterdatensätze

Wetterdatensatz	Quelle	Beschreibung des Datensatzes
TRY 2010 Normaljahr	TRY 2011	Gegenwärtiges mittleres TRY, Basierend auf Messdaten von 1988 - 2007
TRY 2010 sommerheißes Jahr	TRY 2011	Gegenwärtiges sommer-fokussiertes extrem warmes TRY Basierend auf Messdaten von 1988 - 2007
TRY 2015 Normaljahr	TRY 2017	Gegenwärtiges mittleres TRY, Basierend auf interpolierten Messdaten von 1995 - 2012
TRY 2015 sommerheißes Jahr	TRY 2017	Gegenwärtiges sommer-fokussiertes extrem warmes TRY Basierend auf interpolierten Messdaten von 1995 - 2012
TRY 2035 Normaljahr	TRY 2011	Zukünftiges mittleres TRY Basierend auf regionalen Klimamodellen für den Zeitraum 2021 - 2050
TRY 2035 sommerheißes Jahr	TRY 2011	Zukünftiges sommer-fokussiertes extrem warmes TRY Ba- sierend auf regionalen Klimamodellen für den Zeitraum 2021 - 2050
TRY 2045 Normaljahr	TRY 2017	2031 - 2060
TRY 2045 sommerheißes Jahr	TRY 2017	2031 - 2060
2050_A1B	Meteonorm	Aufprägung SRES-Szenario A1B für das Jahr 2050
2050_A2	Meteonorm	Aufprägung SRES-Szenario A2 für das Jahr 2050
2100_A1B	Meteonorm	Aufprägung SRES-Szenario A1B für das Jahr 2100
2100_A2	Meteonorm	Aufprägung SRES-Szenario A2 für das Jahr 2100

### Auswertung der verwendeten Klimadatensätze

Die Auswertung der einzelnen Datensätze für die Standorte Potsdam und Mannheim im Hinblick auf klimatologische Kenntage erfolgt in Abbildung 28 bis Abbildung 33. Die verwendeten klimatologischen Kenn- tage sind wie folgt definiert:

- „Heiße Tage“: Ein Heißer Tag ist ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur  $\geq 30$  °C beträgt.
- „Sommertage“: Ein Sommertag ist ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur  $\geq 25$  °C beträgt.
- „Tropennächte“: Eine Tropennacht ist eine Nacht (18 bis 06 UTC), in der das Minimum der Lufttemperatur  $\geq 20$  °C beträgt.

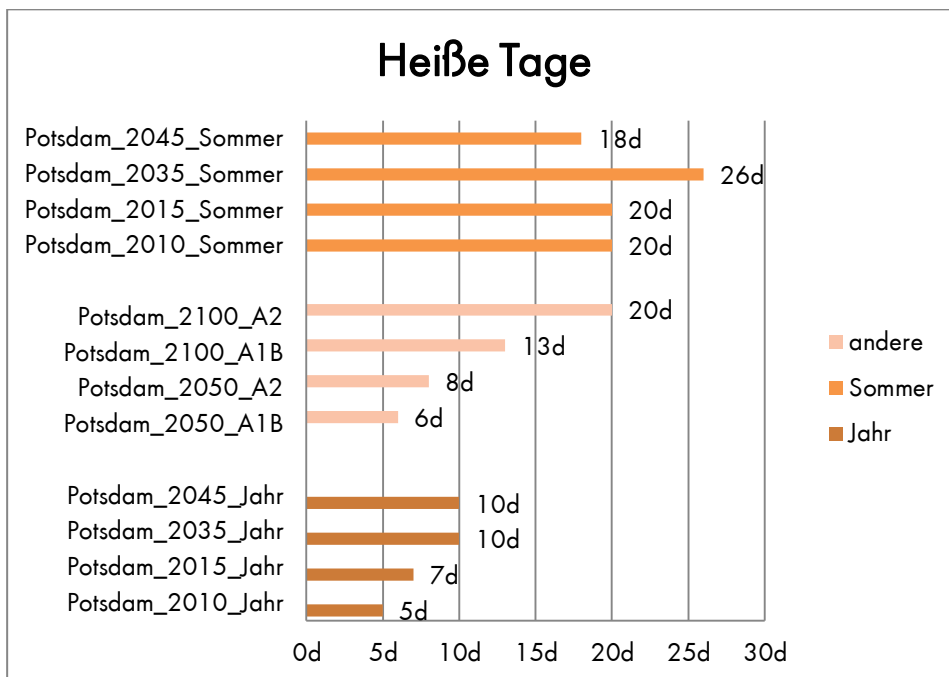


Abbildung 28: Anzahl der heißen Tage für den Standort Potsdam bei unterschiedlichen Datensätzen

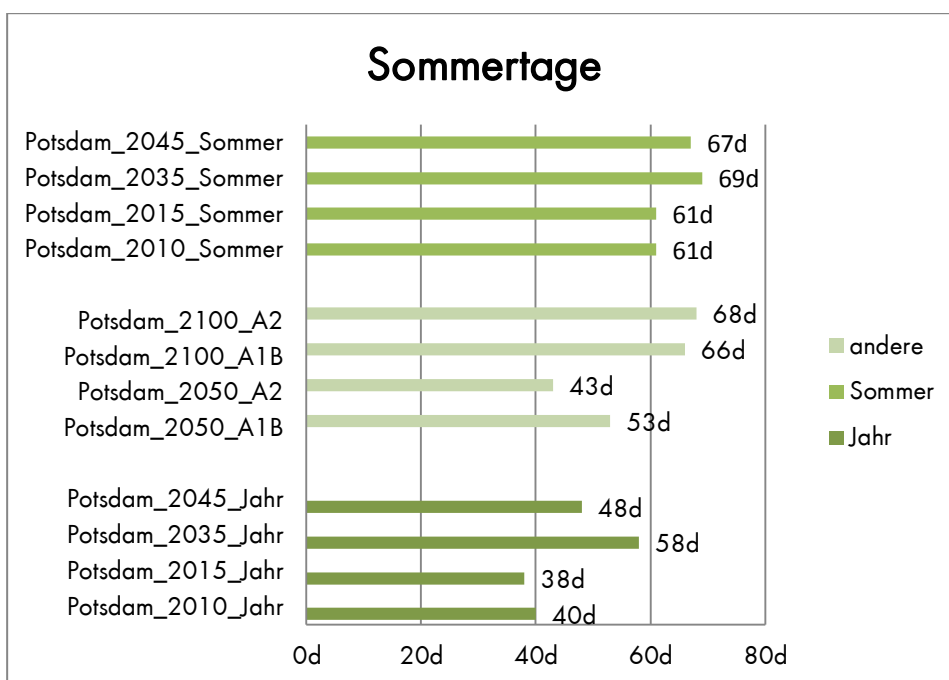


Abbildung 29: Anzahl der Sommertage für den Standort Potsdam bei unterschiedlichen Datensätzen

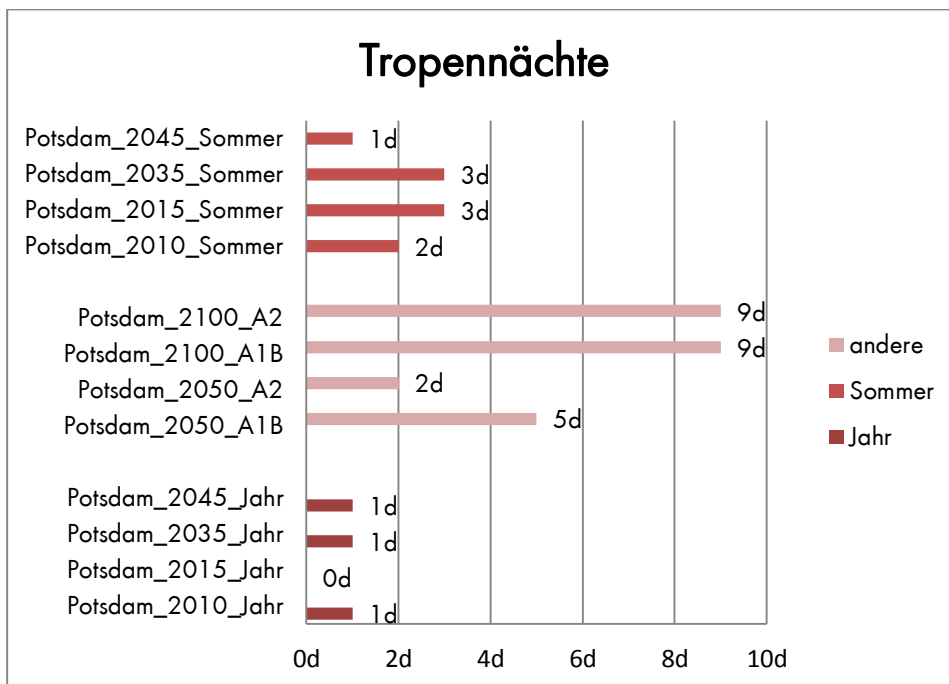


Abbildung 30: Anzahl der Tropennächte für den Standort Potsdam bei unterschiedlichen Datensätzen.

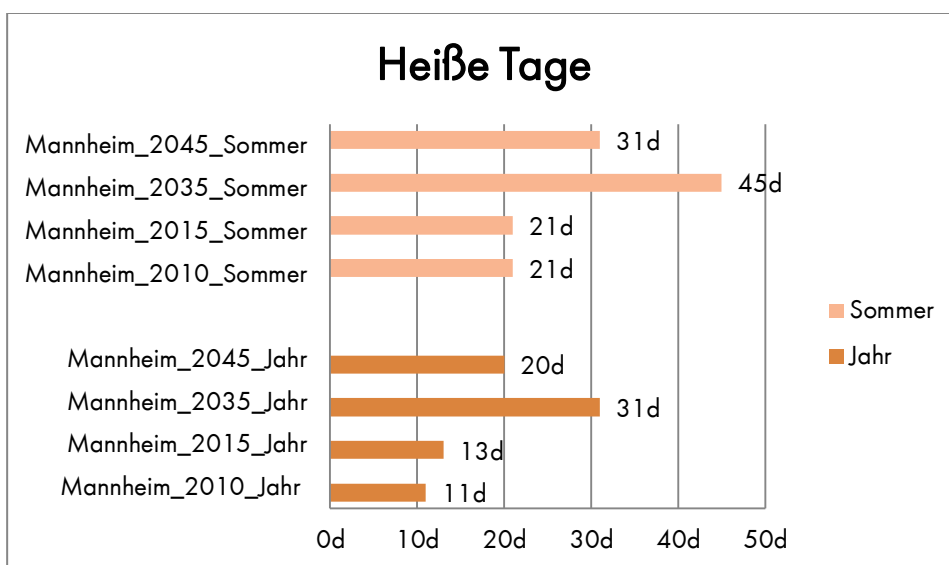


Abbildung 31: Anzahl der heißen Tage für den Standort Mannheim bei unterschiedlichen Datensätzen

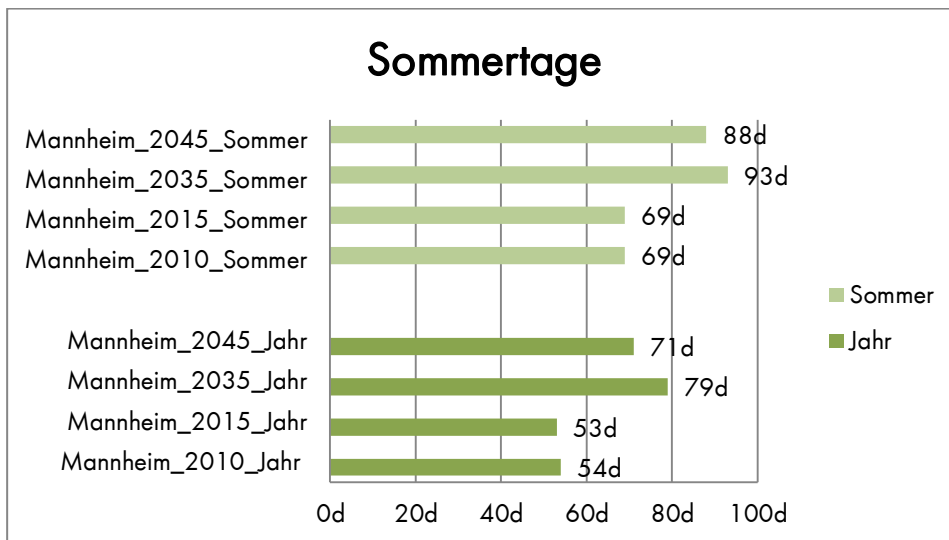


Abbildung 32: Anzahl der Sommertage für den Standort Mannheim bei unterschiedlichen Datensätzen

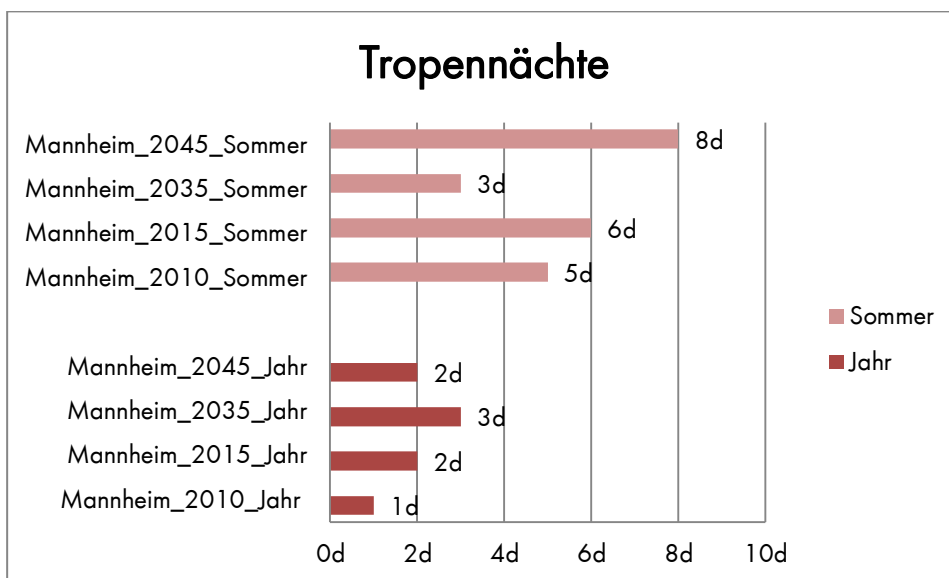


Abbildung 33: Anzahl der Tropennächte für den Standort Mannheim bei unterschiedlichen Datensätzen

## Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der thermisch-dynamischen Simulation der Musterliegenschaft aufgeführt. Die Auswertung erfolgte für die kritischen Räume „Zone 6“, welche den offenen Wohn-/ Essbereich darstellt und für „Zone 12“ das Schlafzimmer 1. OG. Diese sind in Abbildung 34 rot markiert.

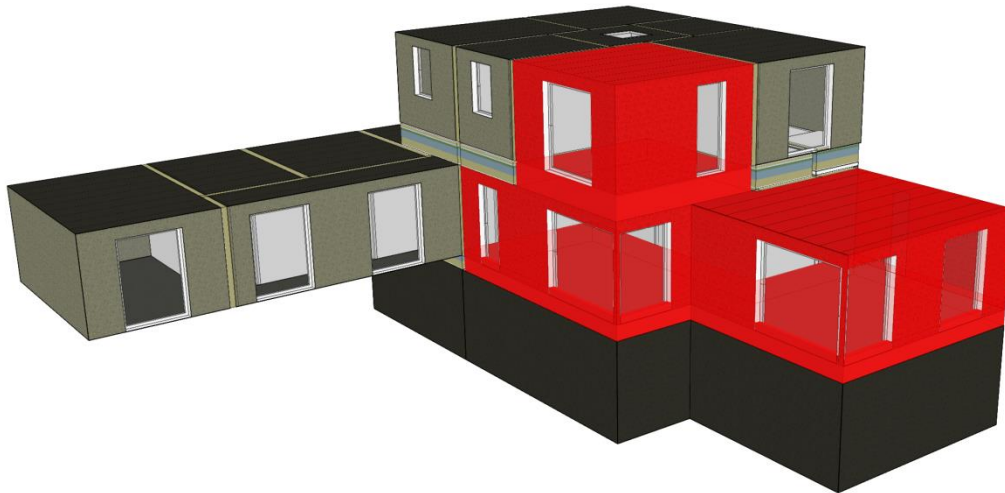


Abbildung 34: In der Klimasimulation ausgewertete Räume

### Auswertung für den Standort Potsdam

Die Simulationsergebnisse (s. Tabelle 16 und Abbildung 35) zeigen, dass der Entwurf der Musterliegenschaft für den in der DIN 4108-2:2013-02 vorgeschriebenen Wetterdatensatz Potsdam\_2010\_Jahr sehr unkritisch zu bewerten ist. Der Wohn- und Essbereich weist als kritischster Raum nur Überschreitungsstunden von 78,4 Kh/a auf. Der maximal erlaubte Wert zur Erfüllung des sommerlichen Wärmeschutzes liegt bei 1200 Kh/a. Unter Verwendung des Datensatzes 2015\_Jahr sinkt die Anzahl der Übertemperaturgradstunden auf etwa die Hälfte (37,3 Kh/a). Dies ist insofern bemerkenswert, da die Auswertung der Ereignistage gezeigt hat, dass der Datensatz Potsdam\_2015\_Jahr zwar geringfügig weniger Sommertage aber mehr heiße Tage aufweist als der Datensatz 2010\_Jahr.

Betrachtet man die Ergebnisse der zukünftigen mittleren Testreferenzjahre 2035 und 2045, so ist ein deutlicher Anstieg zu erkennen (176 Kh/a bzw. 218 Kh/a). Der Datensatz 2045\_Jahr ist nur unwesentlich kritischer als der Datensatz 2035\_Jahr zu bewerten. Vor allem im Vergleich mit den Datensätzen 2050\_A2 und 2050\_A1B erscheint das Simulationsergebnis des Datensatzes als zu kühl. Die Ergebnisse für das Jahr 2100 mit den aufgeprägten Emissionsszenarien A1B und A2B zeigen eine weitere deutliche Steigerung der Übergradstunden auf 1110,9 Kh/a bzw. 1247,2 Kh/a. Dies bedeutet auch, dass Veränderungen an der Musterliegenschaft durchgeführt werden müssten, um die Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes zu erfüllen.

Die Ergebnisse bei Verwendung der sommer-fokussierten, extrem warmen TRY 2010, 2015 und 2035 sind in etwa auf gleichem Niveau wie die Ergebnisse der Klimaprojektionen 2100\_A1B und 2100\_A2. Die Steigerung von 1384,9 Kh/a unter Verwendung von 2010\_Sommer auf 1563,4 Kh/a bei 2035\_Sommer ist konsistent mit der Anzahl der Sommertage und heißen Tage der jeweiligen Datensätze. Im Gegensatz dazu ist die Anzahl der Übertemperaturgradstunden in der Simulation mit dem Datensatz 2045\_Sommer deutlich niedriger (883,7 Kh/a).



Da dieses Ergebnis zweifelhaft erscheint, wurden die Simulationen mit einem Datensatz des nächsten Rasterausschnittes der TRY2017 wiederholt. Die Ergebnisse haben sich allerdings nur unwesentlich verändert. Wieso diese deutlichen Unterschiede zwischen den Datensätzen 2035\_Sommer und 2045\_Sommer für den Standort Potsdam auftreten, konnte bisher nicht abschließend geklärt werden. In einem ersten Schritt wurden daher die TRY 2011 und TRY 2017 alternativ für den Standort Mannheim untersucht. Die Randbedingungen des Simulationsmodells blieben bis auf Standort und Klimadatensatz unverändert.

Tabelle 16: Übertemperaturgradstunden für den Standort Potsdam

Datensatz	Zone 6 in Kh/a	Zone 12 in Kh/a
Potsdam_2010_Jahr	78,4	23,4
Potsdam_2015_Jahr	37,3	5,3
Potsdam_2035_Jahr	176,1	61,6
Potsdam_2045_Jahr	218,0	102,4
Potsdam_2050_A1B	479,9	386,8
Potsdam_2050_A2	398,2	342,7
Potsdam_2100_A1B	1110,9	975,1
Potsdam_2100_A2	1247,2	1089,3
Potsdam_2010_Sommer	1384,9	1381,2
Potsdam_2015_Sommer	1467,5	1407,7
Potsdam_2035_Sommer	1563,4	1516,2
Potsdam_2045_Sommer	883,7	757,5

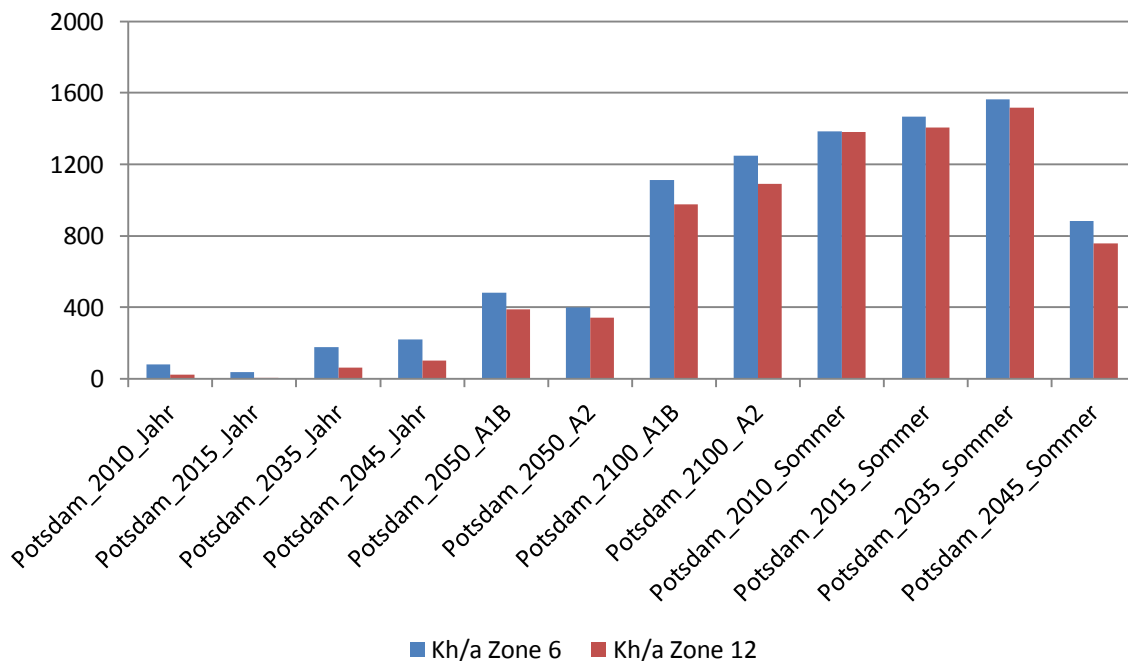


Abbildung 35: Übertemperaturgradstunden in Kh/a für den Standort Potsdam

### Auswertung Standort Mannheim

Die Auswertung der Übertemperaturgradstunden für den Standort Mannheim erfolgte für bessere Vergleichbarkeit analog zum Standort Potsdam für die Grenztemperatur 26 °C. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 36 und der Tabelle 17 dargestellt. Gemäß DIN 4108-2:2013-02 müsste für den Standort Mannheim eine Grenztemperatur von 27 °C herangezogen werden. Mannheim liegt im Vergleich zu Potsdam in einer deutlich wärmeren Klimaregion, was sich sehr deutlich an der Anzahl der Übertemperaturstunden zeigt. Bereits mit Datensatz 2035\_Jahr werden die zulässigen 1200 Kh/a überschritten. Auffällig ist auch hier, dass die zukünftigen Datensätze 2045\_Jahr und 2045\_Sommer unkritischer sind, als ihre jeweilig korrespondieren zukünftigen Datensätze 2035\_Jahr und 2035\_Sommer.

Tabelle 17: Übertemperaturgradstunden für den Standort Mannheim

Datensatz	Zone 6 in Kh/a	Zone 12 in Kh/a
Mannheim_2010_Jahr	369,1	239,6
Mannheim_2015_Jahr	480,6	362,8
Mannheim_2035_Jahr	1549,9	1387,9
Mannheim_2045_Jahr	1381,5	1300,3
Mannheim_2010_Sommer	2060,3	2147,5
Mannheim_2015_Sommer	2126,4	2159,7
Mannheim_2035_Sommer	3106,5	3118,4
Mannheim_2045_Sommer	2873,9	2850,0

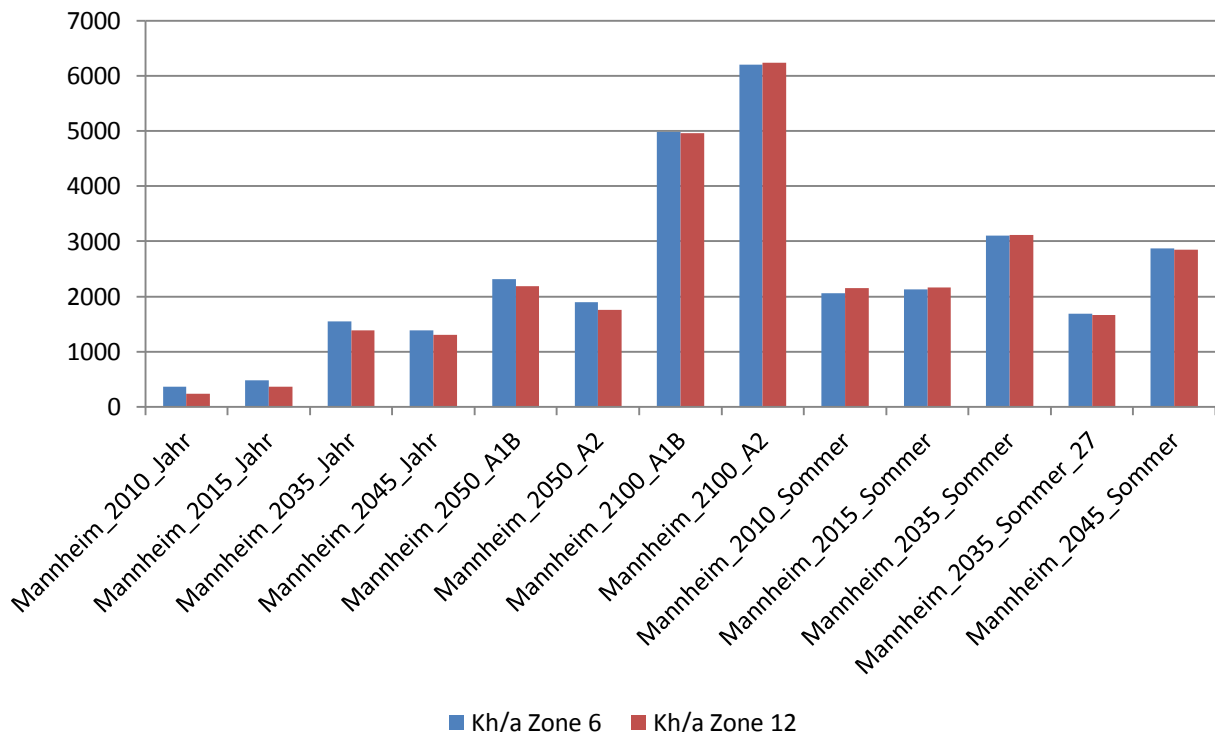


Abbildung 36: Übertemperaturgradstunden in Kh/a für den Standort Mannheim

Betrachtet man die Übertemperaturgradstunden der Datensätze in einem gesammelten Diagramm (s. Abbildung 37), so können Rückschlüsse auf die Expositionsklassen gezogen werden.

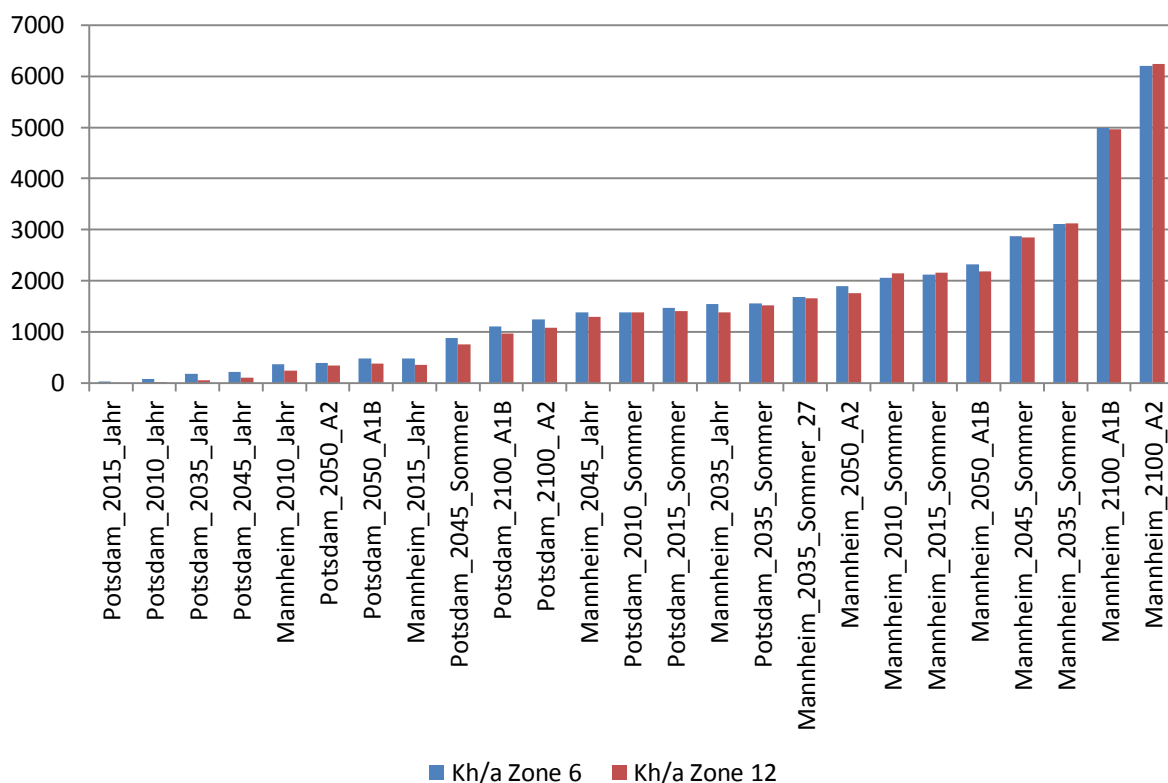


Abbildung 37: Aufsteigend sortierte Übertemperaturgradstunden in Kh/a der einzelnen Datensätze

Aus diesem Diagramm können nun die Expositionsklassen 1, 2 und 3 gebildet werden. Für die Expositionsklasse 1 wurde der Datensatz Potsdam\_2035\_Jahr gewählt. Dieser Datensatz basiert auf der gleichen Datengrundlage wie der Datensatz Potsdam\_2010\_Jahr, auf die auch in der DIN 4108-2:2013-02 verwiesen wird. Gleichzeitig berücksichtigt dieser Datensatz die Klimaänderung bezogen auf das Jahr 2035. Für die Expositionsklasse 3 werden die Datensätze der Szenarien A1B und A2 nicht weiter berücksichtigt, da diese nicht frei verfügbar sind und daher unzureichend frei anwendbar sind. Dadurch berücksichtigt die Expositionsklasse 3 den Extremfall der Testreferenzjahrsdatensätze (Mannheim\_2035\_Sommer). Die Expositionsklasse 2 bildet mit dem Datensatz Potsdam\_2010\_Sommer den ungefähren Mittelwert zwischen der niedrigsten und der höchsten Expositionsklasse ab. In der Tabelle 18 sind die Expositionsklassen für die Einwirkung Sommerhitze dargestellt.

Tabelle 18: Expositionsklassen für die Einwirkung Sommerhitze

Expositionsklasse	Datensatz
1	Potsdam_2035_Jahr
2	Potsdam_2010_Sommer
3	Mannheim_2035_Sommer

## 6.2. Starkregen

Um den Einfluss des Klimawandels und damit die Einwirkungen auf die Liegenschaft festzustellen, werden die Schwellenwerte der Starkregenereignisse aus der Unwetterwarnung des DWD mit dem Klimaänderungsfaktor multipliziert. Zusätzlich zu den Schwellenwerten des DWD entwickelte Mundersbach 2016) einen Starkregenindex, der auf KOSTRA basiert und der die Jährlichkeit mit der Dauer eines Starkregenereignisses ins Verhältnis setzt. So ist beispielsweise ein Ereignis mit einer höheren Jährlichkeit und einer kurzen Dauer schädlicher als ein Ereignis mit einer geringen Jährlichkeit und einer langen Dauer. Die Skala des einheitslosen Index reicht von 1 (schwächster Index) bis 11 (stärkster Index) (s. Tabelle 20). Durch den Starkregenindex ist es möglich, Einwirkungen und deren verursachten Schaden vergleichbar zu machen. Er stellt somit ein Werkzeug zur Risikoabschätzung und -bewertung dar. Schmitt et al. (2018) entwickelte den Starkregenindex weiter und teilte jeder Wiederkehrperiode einen festen Indexwert zu. Weiterhin reicht der Index nun von 1 bis 12. Jeder wasserwirtschaftlich relevanten Wiederkehrzeit zwischen 1 Jahr und 100 Jahren wird ein fester Indexwert von 1 bis 7 zugeordnet. Jedem der SRI-Werte zwischen 8 und 12 wird hingegen eine Bandbreite von Skalierungsfaktoren zugeordnet, die mit der Niederschlagshöhe des hundertjährigen Ereignisses multipliziert werden (Schmitt 2017). Durch das sich ergebende Spektrum von Niederschlagshöhen im Bereich der extremen Starkregenereignisse wird im Zuge einer leicht verständlichen Risikokommunikation auf eine Zuordnung der Indexwerte zur Wiederkehrzeit verzichtet (Schmitt et al. 2018). In Tabelle 19 ist der Starkregenindex nach ebd. (2018) mit der Einteilung der Ereignisse in Kategorien und der Zuordnung der Wiederkehrzeiten zu SRI-Werten dargestellt.

Tabelle 19: Starkregenindex nach Schmitt et al. (2018)

Wiederkehrzeit $T_n$ in a	1	2	3,3	5	10	20	25	33,3	50	100	> 100				
Kategorie	Starkregen				Intensiver Starkregen				Außergewöhnlicher Starkregen		Extremer Starkregen				
Starkregenindex SRI	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Erhöhungsfaktor										1,00	1,20 - 1,39	1,40 - 1,59	1,60 - 2,19	2,20 - 2,79	≥ 2,80

Tabelle 20: Starkregenindex nach Mundersbach (2016)

Starkregenindex nach MUDERSBACH									
Dauer [min]	Jährlichkeit [a]								
	1	2	5	10	20	30	50	100	
5	1	2	3	4	5	6	7	8	
10	1	2	3	4	5	6	7	8	
15	1	2	3	5	6	6	7	8	
20	1	2	4	5	6	6	7	8	
30	1	2	4	5	6	6	7	8	
45	1	3	4	5	6	7	7	8	
60	1	3	4	5	6	7	8	9	
90	1	3	4	5	6	7	8	9	
120	1	3	4	5	6	7	8	9	
180	1	3	4	6	7	7	8	9	
240	1	3	5	6	7	7	8	9	
360	1	3	5	6	7	7	8	9	
540	1	4	5	6	7	8	8	9	
720	1	4	5	6	7	8	8	10	
1080	1	4	5	6	7	8	9	10	
1440	1	4	5	6	7	8	9	10	
2880	1	4	6	7	8	8	9	10	
4320	1	4	6	7	8	8	9	10	
5760	1	5	6	7	8	9	9	10	
7200	1	5	6	7	8	9	9	10	
8640	1	5	6	7	8	9	9	11	

Da die Bemessung von Bauteilen und Entwässerungsanlagen für Dach- und Grundstücksflächen nach DIN 1986-100:2016-12 anhand von Regenspenden unterschiedlicher Dauerstufen und Jährlichkeiten erfolgt, ist es sinnvoll, den Starkregenindex je Expositionsklasse zu ermitteln. So kann bei einer späteren Bemessung der Bauteile die benötigte Dauerstufe des Starkregens ermittelt werden. Die in der Norm angegebenen Bemessungsregenspenden wurden nach KOSTRA-DWD-2010 ermittelt und sind je nach Standort unterschiedlich. In der Tabelle 21 sind die Dauer, Jährlichkeiten und die entsprechenden Starkregenindizes der Bemessungsregenspenden dargestellt. Es wird deutlich, dass für die Bemessung der Notentwässerung ein höherer Starkregenindex angesetzt wird, als er in der Expositionsklasse 3 angegeben wird. Auch die Expositionsklasse Mittel sollte an den entsprechenden Starkregenindex angepasst werden. Da die Bemessungsregenspende für die Entwässerung relevant wird, wird der hier ermittelte Starkregenindex als kritisch erachtet und für die Aufstellung der Expositionsklassen verwendet.

Tabelle 21: Dauer, Jährlichkeit und Starkregenindex der Bemessungsregenspenden nach DIN 1986-100:2016-12

	Dachflächen		Grundstücksflächen					
	5	5	5	5	10	10	15	15
Regendauer in min	5	5	5	5	10	10	15	15
Bemessung (B)/Notentwässerung (N)	B	N	B	N	B	N	B	N
Jährlichkeit in a	5	100	2	30	2	30	2	30
Starkregenindex nach Mudersbach (2016)	3	8	2	6	2	6	2	6
Starkregenindex nach Schmitt et al. (2018)	2	7	1	5	1	5	1	5

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden beide Ansätze miteinander verglichen. Es zeigte sich, dass sich bei beiden Ansätzen bei kürzeren Niederschlagsdauern die nahezu identische Jährlichkeit eines Starkregenereignisses ergibt. Bei höheren Dauerstufen hingegen macht sich die Berücksichtigung der Niederschlagsdauern bei Mudersbach (2016) bemerkbar und die Jährlichkeit nimmt ab. Die Einbeziehung der Niederschlagsdauern erlaubt eine bessere Risikobewertung der Regenereignisse, sodass der Ansatz nach Schmitt et al. (2018) als stark vereinfachende Herangehensweise gesehen werden kann. Betrachtet man die nach Tabelle 21 benötigten kurzen Dauerstufen bis maximal 15 Minuten stellen sich keine Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen ein. Allerdings wird der Ansatz nach ebd. (2018) bereits in anderen Forschungsprojekten und vom BBSR angewandt (vgl. BBSR 2018b) angewandt. Zusätzlich ist die Handhabung einfacher, da jeder Jährlichkeit nur ein Indexwert zugeordnet ist und der entsprechende Indexwert nicht erst über eine Berechnung bestimmt werden muss. Dazu findet eine Bemessung auf der sicheren Seite statt. Davon ausgehend wird im weiteren Verlauf dieses Berichts der Starkregenindex nach Schmitt et al. (2018) verwendet. In der Tabelle 22 finden sich die für die weitere Arbeit verwendeten Expositionsklassen für die Einwirkung Starkregen.

Tabelle 22: Expositionsklassen für die Einwirkung Starkregen

Expositionsklasse	Starkregenindex
1	2
2	5
3	7

Anhand des Starkregenindex kann nun die Regenspende je Dauerstufe ermittelt werden. Für die frei erhältliche KOSTRA-DWD-2010-Mustertabelle (DWD 2016c) des DWD ergeben sich beispielhaft folgende Regenspenden für den Musterstandort (Tabelle 23). Die Werte sind allerdings erheblich geringer als die tatsächlichen Werte aus dem Anhang A1 der DIN 1986-100:2016-12 sodass die Tabelle nur beispielhaft für die Ermittlung der Niederschlagshöhen dienen kann.

Tabelle 23: Klimaangepasste Niederschlagshöhen in mm für den Musterstandort nach DWD 2016c

	1			2			3		
	Jährlichkeit	N in mm	NKlimaangepasst in mm	Jährlichkeit	N in mm	NKlimaangepasst in mm	Jährlichkeit	N in mm	NKlimaangepasst in mm
5 min	5	8,7	10,4	30	12,6	15,1	100	15,1	18,1
10 min	5	13,1	15,7	30	18,4	22,1	100	22,0	26,4
15 min	5	16,1	19,3	30	22,6	27,1	100	26,9	32,3
20 min	2 - 5	16,5	19,8	30	25,8	31,0	100	30,7	36,8
30 min	2 - 5	19,4	23,3	30	30,7	36,8	100	36,7	44,0
45 min	2	19,4	23,3	30	35,9	43,1	100	43,2	51,8
60 min	2	20,9	25,1	30	39,8	47,8	50	43,4	52,1
120 min	2	24,0	28,8	20	39,8	47,8	50	50,9	61,1
360 min	2	30,2	36,2	10	45,7	54,8	50	56,5	67,8

Die Jährlichkeiten für die Entwässerung von Kanalsystemen dürfen laut DIN 1986-100:2016-12 vorhabenbezogen bestimmt werden, müssen jedoch mindestens eine Jährlichkeit von  $a = 30$  Jahren betragen. Über diese entwickelte Methodik können auch höhere Jährlichkeiten im Hinblick auf Klimaänderungen angepasst werden. In einer früheren Bearbeitungsstufe des Projekts KLIBAU erfolgte bereits eine Einteilung in Expositionsklassen (s. Tabelle 24).

Tabelle 24: Expositionsklassen Starkregen nach INTEP (7. 11. 2018)

Expositionsklasse	Niederschlag
1	leichter Regen, 5 mm Niederschlag/6 Std.
2	Heftiger Starkregen > 35 mm Niederschlag/6 h
3	Extrem ergiebiger Dauerregen > 70 mm Niederschlag/12 h / oder > 90 mm/48 h

Aus Sicht der Verfasser sind die Expositionsklassen aus mehreren Gründen anzupassen. Die Expositionsklasse 1 entspricht einer üblichen Regenmenge oder einem leichten Landregen. Diese Expositionsklasse wird jedoch bereits durch den Stand der Technik erfasst und stellt keine Gefahr für Gebäude dar. Somit ist aus Sicht der Autoren die Expositionsklasse 1 deutlich zu niedrig angesetzt. Die Expositionsklassen 2 und 3 orientieren sich an den Wetterwarnstufen des DWD aus Tabelle 3. Die Expositionsklasse 2 wurde ebenso in einem ersten Ansatz in diesem Bericht verwendet. Allerdings liegt der Starkregenindex hier deutlich unter dem Starkregenindex der aus der DIN 1986-100:2016-12 vorgegebenen Bemessungsregenspenden. Daher wird auch diese Expositionsklasse als zu niedrig angesehen. Die Expositionsklasse 3 berücksichtigt Dauerregen mit einer Dauer länger als 12 h. Diese Dauerstufe ist für das Gebäude eher für die Einwirkung Hochwasser relevant. Für die Einwirkungen Starkregen ist es zielführender, kürzere Dauerstufen bis maximal 2 Stunden zu betrachten, die sich für die lokale Entwässerung als kritisch erweist. Weiterhin berücksichtigt keine der in Tabelle 24 aufgeführten Expositionsklassen zu erwartende Veränderungen durch den Klimawandel. Teilweise liegen die Werte unter den aktuellen Anforderungen an die Bemessung, ohne dass Klimaänderungen mit einbezogen wurden. Aus diesen Gründen werden die von INTEP festgelegten Expositionsklassen durch die in Tabelle 22 ermittelten Expositionsklassen ersetzt. Für die weitere Bearbeitung ist festzuhalten, dass die Einwirkung Starkregen eine Gefahr für die Dichtigkeit von Gebäuden ist, aber keine Gefahr für die Statik darstellt. Die DIN EN 12208:1999 und die DIN EN 12154:1999 regeln die Dichtigkeit von Fenstern, Türen und Vorhangfassaden. Die Ausschreibung und Planung erfolgt anhand der in den Normen festgelegten Dichtigkeitsklassen. Für die Statik hingegen spielt Starkregen eine untergeordnete Rolle, da in vielen Regionen der Schneelastfall den Regenlastfall abdeckt. Notüberläufe auf dem Dach stellen sichern, dass anstauendes Regenwasser eine vordefinierte Höhe nicht überschreitet.

### 6.3. Hochwasser

Für die Einwirkung Hochwasser muss zu Beginn eine Unterteilung in zwei Arten des Entstehens von Hochwassern gemacht werden. Zum einen kann Hochwasser in Abhängigkeit eines Gewässers entstehen, zum anderen niederschlagsinduziert als Folge eines kurzen heftigen Starkregens (Sturzflut). Gewässerabhängige Hochwasser entstehen aufgrund von lang anhaltenden starken Regenfällen, die im Einzugsgebiet von Flüssen auftreten. Hier sind ausschließlich Liegenschaften betroffen, die in einem entsprechenden Risikogebiet liegen. Die zweite Art von Hochwassern entwickelt sich aufgrund von lokal auftretenden kurzzeitigen extremen Regenfällen, die nicht versickern können und daher auf der Oberfläche abfließen. Die Gefahr dieser kurzzeitig auftretenden Hochwasser ist, dass eine Vorhersage über ein Auftreten nur schwer möglich ist, da sie von vielen Faktoren abhängt. Dies sind neben der Topographie auch die Bodenbeschaffenheit und die Umgebungsbebauung. Bei Sturzfluten kann es aufgrund der kurzzeitig anfallenden Wassermassen zu einem Versagen der Abwasser- und Kanalisationssysteme kommen. Der sich bildende Rückstau stellt eine Gefährdung des Gebäudes bzw. der Liegenschaft dar. Durch mitgeschwemmtes Geröll oder Äste kann es zu Abflussbehinderungen kommen, welche das Hochwasser weiter verstärken. Weiterhin können mitgeschwemmte Autos durch Aufprall zu drastischen baustatischen Schäden führen.

Dies ist jedoch als Ausnahmefall zu betrachten. Die Erfassung der Gefährdung durch starkregeninduzierte Hochwasser ist flächendeckend nur mit großem Aufwand möglich. Goderbauer-Marchner/Sontheimer (2015: 30) schreiben hierzu, dass für die detaillierte Gefährdungslage Simulationen notwendig sind. Prinzipiell gefährdet sind aber Gebäude, die an kleinen Tälern, in Senken oder in Hanglage gebaut sind. Es existieren allerdings keine gesetzlichen Regelungen für fließgewässerunabhängige Abflüsse, da diese als direkte Folgen von Starkregen nicht unter das Wasserhaushaltsgesetz des Bundes fallen (Bach et al. 2013: 76). Da es mit großem Arbeitsaufwand verbunden ist und zusätzlich der Einwirkung nicht genüge getan wird, drei allgemeine Expositionsstufen zu definieren, wird die Sensitivität der Liegenschaft näher im Kapitel 7.4.5 betrachtet, während für die Einwirkung Hochwasser Expositionsklassen für gewässerabhängige Hochwasser festgelegt werden.

Zur Bemessung von Hochwasserschutzmaßnahmen werden verschiedene Hochwasserabflüsse mit den entsprechenden Jährlichkeiten statistisch bestimmt. Wichtig sind dabei die Hochwasser  $HW_{100}$  und  $HW_{Extrem}$ . Das  $HW_{100}$  steht für ein Hochwasser, das rein statistisch gesehen einmal in hundert Jahren auftritt. Das  $HW_{Extrem}$  hingegen ist nicht eindeutig bestimmt sondern kann von Bundesland zu Bundesland mit verschiedenen Jährlichkeiten aufgestellt werden. Die Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser stellt dazu lediglich fest, dass Extremhochwasser „im statistischen Mittel deutlich seltener als alle 100 Jahre auftreten“ (LAWA 2010: 10). Zusätzlich berücksichtigt ein  $HW_{Extrem}$  auch das Versagen von Schutzeinrichtungen (WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH 2015: 7). In einigen Bundesländern wird für die Festlegung des  $HW_{Extrem}$  der Hochwasserabfluss  $HQ_{100}$  mit einem Faktor von 1,3 oder 1,4 skaliert (Schumann 2012: 1).

Tabelle 25: Expositionsklassen Hochwasser

Expositionsklassen	Hochwasser
1	1,2 * $HQ_{100}$
2	1,0 * $HQ_{Extrem}$
3	1,2 * $HQ_{Extrem}$

Für die Ermittlung der Expositionsklasse eines Gebäudes ist in erster Linie anhand der Hochwassergefährdungskarten der Länder zu klären, ob die Liegenschaft in einem hochwassergefährdeten Gebiet liegt. Ist dies nicht der Fall, sind auch keine gesonderten Vorsorgemaßnahmen gegenüber Hochwasser zu treffen. Kann jedoch für die Liegenschaft eine Gefährdung festgestellt werden, so sollten die Expositionsklassen in Tabelle 25 angewandt werden. Für die Einwirkungen Niedrig und Hoch wird der Klimaänderungsfaktor verwendet, um der zunehmend drohenden Gefahr einer Verstärkung von Hochwassern aufgrund des Klimawandels Rechnung zu tragen. Die Bemessung der Entwässerungsanlagen erfolgt momentan auf ein  $HW_{100}$ . Um die Veränderung durch den Klimawandel abzubilden, wird für die niedrigste Expositionsklasse der Klimaänderungsfaktor berücksichtigt. Die mittlere Stufe bildet das  $HQ_{Extrem}$  ab, das für die jeweilige Region zur Bemessung gebildet wird. Die höchste Stufe bildet das  $HQ_{Extrem}$  unter Berücksichtigung des Klimaänderungsfaktors, um auch hier den Einfluss des Klimawandels abzubilden.

#### 6.4. Hagel

Als Vorreiter bezüglich der leicht verständlichen Einschätzung der Hagelgefahr und der einheitlichen Prüfung des Hagelwiderstands von Bauteilen ist die Vereinigung Kantonaler Gebäudeversicherungen der Schweiz zu nennen, die aus der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen hervorgegangen ist. Für die Schweiz liegen Karten der Hagelgefährdung bei Wiederkehrperioden von 50, 100 und 300 Jahren vor. Beispielsweise ist in der Nord- und der Zentralschweiz alle 50 Jahre mit einem Hagelkorndurchmesser von 3 cm und alle 100 Jahre mit einem Hagelkorndurchmesser von 4 cm zu rechnen (VKG 2018). Diese Ergebnisse lassen sich näherungsweise auf Deutschland übertragen. So ist in Süddeutschland und insbesondere in den stark gefährdeten Gebieten südlich von Stuttgart und München ungefähr von der gleichen Gefährdung wie in der Nordschweiz auszugehen, während in Norddeutschland aktuell alle 50 Jahre nur mit Hagelkörnern des Durchmessers 1 cm zu rechnen ist (Weller/Naumann/Jakubetz 2012: 38 ff.)

Im Vorgängerbericht der Firma INTEP (2018) finden sich für die Einwirkung Hagel die folgendermaßen definierten Expositionsklassen: Expositionsklasse 1 Hagelkorndurchmesser 1 cm, Expositionsklasse 2 Hagelkorndurchmesser 3 cm, Expositionsklasse 3 Hagelkorndurchmesser > 5 cm. Die Durchmesser entsprechen den Hagelwiderstandsklassen  $HW_1$ ,  $HW_3$  und  $HW_5$  gemäß dem Hagelregister ([www.hagelregister.ch](http://www.hagelregister.ch)) der Schweiz. Insbesondere der Wert für die Expositionsklasse 1 scheint zu niedrig gewählt. Bereits heute ist in Norddeutschland, dem durch Hagel am geringsten gefährdeten Gebiet der Bundesrepublik, nach Weller/Naumann/Jakubetz (2012) bei einem 50-jährlichen Hagelereignis mit einem Hagelkorndurchmesser von mindestens 1 cm zu rechnen. In allen anderen Bereichen der Bundesrepublik sind bei einem 50-jährlichen Ereignis größere Hagelkorndurchmesser zu erwarten, obwohl diese Einteilung die Auswirkungen des Klimawandels noch nicht berücksichtigt. Um für Norddeutschland eine Erhöhung der Hagelgefährdung abzubilden, wird für die neue Expositionsklasse 1 folglich ein Hagelkorndurchmesser von 2 cm definiert. Weiterhin empfiehlt die Schweizer Vereinigung Kantonaler Gebäudeversicherungen VKG, dass Bauteile in der Schweiz die Hagelwiderstandsklasse 3 aufweisen sollen, was einem Durchmesser der Hagelkörner von 3 cm entspricht (VKG 2018). Da die Schweiz allerdings einer deutlich höheren Gefährdung durch Hagel ausgesetzt ist, scheint eine Erhöhung der Expositionsklasse 1 auf 3 cm nicht angemessen. Um mit der Expositionsklasse 2 auch für die am stärksten gefährdeten Bereiche Deutschlands eine Erhöhung der Einwirkung abzubilden, wird diese auf einen Hagelkorndurchmesser von 4 cm definiert. Für die Expositionsklasse 3 wird die höchste definierte Hagelwiderstandsklasse mit einem Hagelkorndurchmesser von 5 cm definiert. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass eine Anpassung an die Einwirkung Hagel in der Regel entweder durch eine angepasste Schichtenfolge oder durch die Wahl eines Materials mit dem entsprechenden Hagelwiderstand erfolgen kann. Bei Anpassung der Schichtenfolge wird die vulnerable Bauteilschicht der Einwirkung vollständig entzogen, sodass die tatsächliche Größe des einwirkenden Hagelkorns sehr häufig unbedeutend wird.



Bei der Auswahl eines hagelwiderstandsfähigeren Produkts ändert sich entweder das Material der entsprechenden Schicht oder es wird bei gleichem Material eine höhere Schichtstärke erforderlich. Der prinzipielle Konstruktionsaufbau bleibt in der Regel aber unverändert. Die Expositionsklassen werden daher im Rahmen des Projekts auf die in Tabelle 26 genannten Werte definiert.

Tabelle 26: Expositionsklassen Hagel

Expositionsklasse	Hagelkomgröße
1	2 cm
2	4 cm
3	5 cm

## 6.5. Sturm

Es bleibt festzustellen, dass aus den Klimaprojektionen keine klaren Erkenntnisse über die Entwicklung von Starkwindereignissen zur Mitte und zum Ende des 21. Jahrhunderts ableitbar sind. Herr Dr. Bodo Wichura vom Deutschen Wetterdienst, Abteilung Klima- und Umweltberatung, Regionales Klimabüro Potsdam hat diese Erkenntnisse bestätigt. Demnach sind Klimamodelle aktuell nicht in der Lage Windböen abzubilden. In Übereinstimmung mit Herrn Dr. Wichura wird im Rahmen des Projektes empfohlen, die aktuell gültigen Bemessungswerte für Windlasten nach DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 nicht zu erhöhen (Wichura 2019).

Im Vorfeld des Projekts KLIBAU wurden folgende Expositionsklassen definiert: Die Expositionsklasse 1 liegt bei 8,0 – 10,7 m/s, die Expositionsklasse 2 entspricht der Windzone 1 der DIN EN 1991-1-4:2010-12 und entspricht einem Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit von 22,5 m/s während die Expositionsklasse 3 der Windzone 4 nach DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 mit einem Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit von 30 m/s entspricht. Auch an dieser Stelle sollten die Werte nach Ansicht der Verfasser angepasst werden. Die Expositionsklasse 2 wird bereits jetzt durch die niedrigste Windzone der aktuell gültigen Norm abgedeckt. Dementsprechend erscheint es als unwahrscheinlich, dass bei der bisher definierten Expositionsklasse 1 mit 8,0 – 10,7 m/s überhaupt Schäden an Gebäuden auftreten. Eine Ausnahme stellen Außenjalousien (Raffstore) dar. Doch selbst standardmäßige seilgeführte randgebördelte Lamellen oder Flachlamellen müssen bei Abmessungen von 3,0 m x 3,5 m erst ab einem Windgrenzwert von 10 m/s eingefahren werden (Warema Renkhoff SE 2018: 433). Dementsprechend wird die bisherige Expositionsklasse 1 als zu gering betrachtet. Für die weitere Projektbearbeitung sollten die Expositionsklassen aus Tabelle 27 verwendet werden.

Tabelle 27: Expositionsklassen Sturm

Expositionsklasse	Windstärke
1	Windzone 1, entspricht 22,5 m/s
2	Windzone 2 - 3, entspricht 26,3 m/s
3	Windzone 4, entspricht 30 m/s

## 7. Bautechnische Handlungsempfehlungen und deren mögliche Klima- und Umweltpotentiale

### 7.1. Konstruktionen

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 6.1 wurden verschiedene Außenwandaufbauten anhand der aufgestellten Expositionsklassen im Hinblick auf die erzielten Übertemperaturgradstunden untersucht. Grundlegend bei der Untersuchung der einzelnen Varianten ist, dass der U-Wert der Ausgangskonstruktion von  $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  erreicht wird. Orientiert werden sollte sich bei der Wahl der Außenwandkonstruktion in einer ersten Überlegung an regionaltypischen Bauweisen. Aus den regionaltypischen Bauweisen in Deutschland haben sich im Laufe der Zeit jedoch klassische Bauweisen entwickelt, die nun regionsunabhängig verwendet werden. Erhöhte gesetzliche Anforderungen wie die der EnEV haben zu diesen standardisierten Bauweisen geführt. Neubau-Bauweisen in Deutschland sind somit i.d.R. nicht mehr regionaltypisch vertreten. In gewisser Weise stellt das zweischalige Mauerwerk eine Ausnahme dar. Diese Bauweise ist insbesondere in Nord- und Nordwest-Deutschland weit verbreitet, wird aber auch in den anderen Regionen Deutschlands teilweise angewendet.

Die Entwicklung der Außenwandkonstruktionen resultiert dabei zunächst aus einzelnen, gezielten Veränderungen der Schichten. So bildet der Bauteilaufbau in der Abbildung 38 die Ausgangssituation, wie sie in den Planunterlagen der Musterliegenschaft vorgesehen ist, dar. Der detaillierte Bauteilaufbau ist ebenso bereits in der Tabelle 9 dargestellt. Es handelt sich um eine Mauerwerkskonstruktion aus Kalksandstein, die mit einem WDVS-System gedämmt wird.

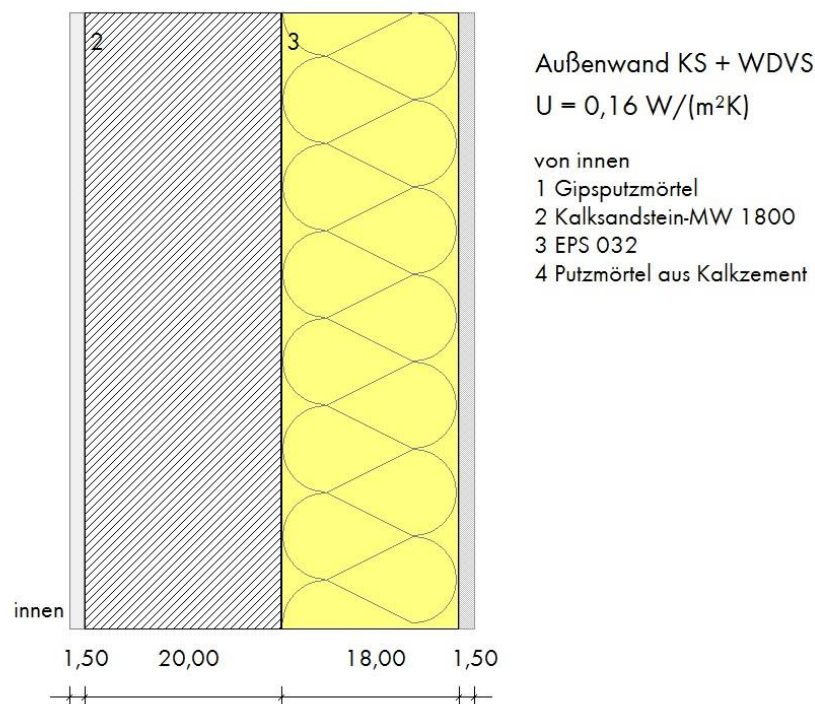


Abbildung 38: Schichtaufbau Außenwand Kalksandstein mit WDVS aus EPS (Ausgangsvariante)

Aus Sicht einer sortenreinen Trennung der Bauteile und einer hohen Recyclingquote ist die Verwendung von Gips-Innenputz kritisch einzuschätzen. Die leicht löslichen Bestandteile des Gips können im Bauschutt mit anderen Bestandteilen des Bauschutts oder bei der Verarbeitung von Zement zu Beton reagieren und schwere, irreparable Schäden nach sich ziehen (Müller 2012: 26). In der ökobilanziellen Betrachtung in der Abbildung 39 und der Abbildung 40 ist der Gipsputz bereits durch einen Kalk-Innenputz ersetzt.

Zur besseren Vergleichbarkeit der verschiedenen Ausführungsvarianten des WDVS werden drei Varianten bilanziert. Bei der Variante 1 wird das System geklebt und gedübelt, während die Variante 2 nur geklebt wird. In einem dritten Schritt wird die EPS-Dämmung durch eine Mineralwolle-Dämmung mit derselben Dicke und demselben Wärmedurchlasswiderstand ersetzt, welche sowohl geklebt als auch gedübelt wird. Es zeigt sich, dass die Variante mit Mineralwolle das niedrigste Treibhauspotential aufweist. In der Abbildung 39 ist das Treibhauspotential und in der Abbildung 40 der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf verschiedener Varianten des Wärmedämmverbundsystems untersucht. Es zeigt sich, dass die Mineralwolle sowohl für das Treibhauspotential als auch für den Nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf den niedrigsten Wert aufweist. Dies liegt insbesondere an der Herstellung von Mineralwolle, in der weniger Energie benötigt wird als für EPS. Vorteilhaft an der geklebten Variante des WDVS mit EPS ist der Verzicht auf die Befestigungsmittel. Dadurch reduzieren sich die Werte der Variante 2 gegenüber der Variante 1.

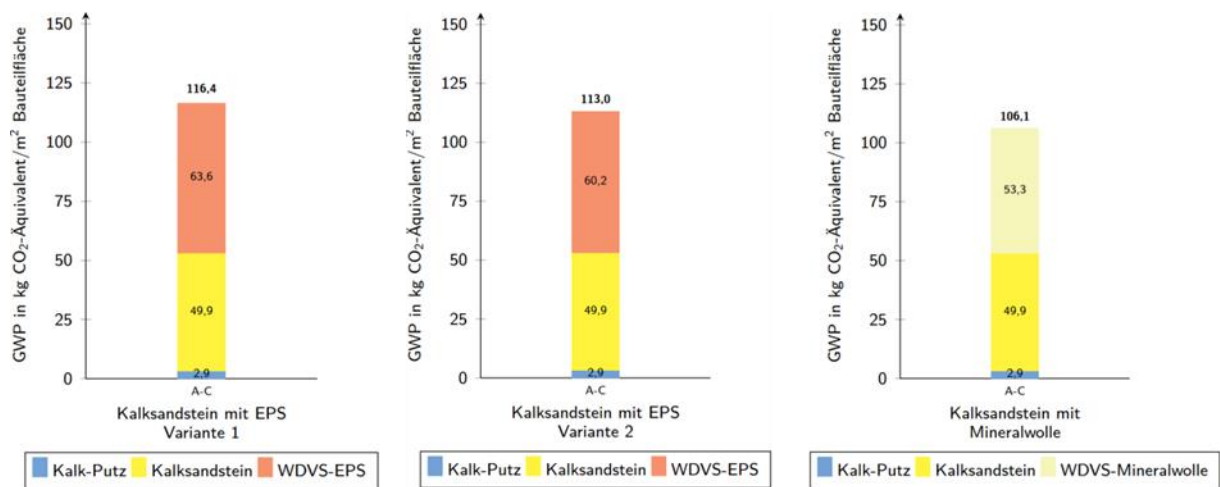


Abbildung 39: Treibhauspotential verschiedener Varianten mit Kalksandstein und WDVS in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

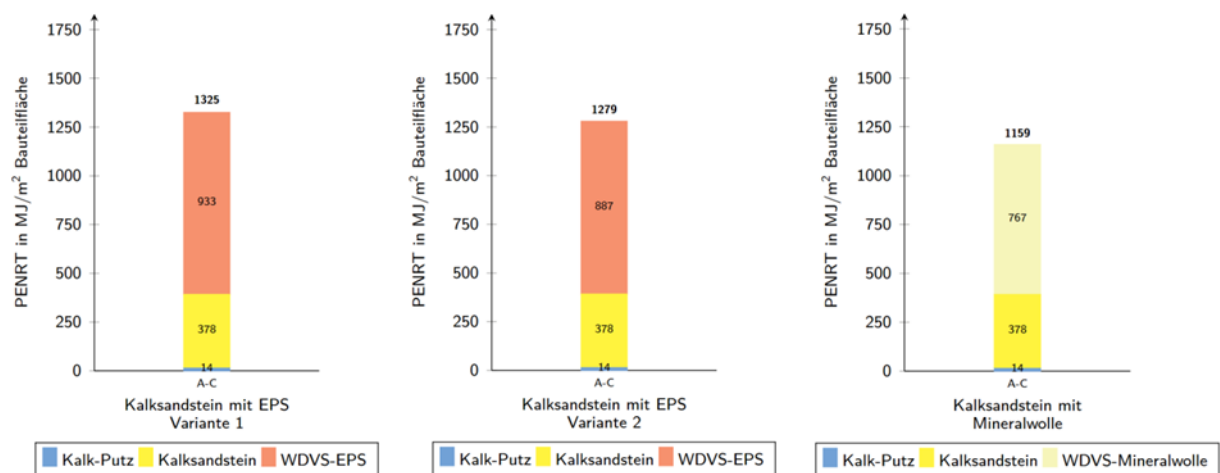


Abbildung 40: Nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf verschiedener Varianten mit Kalksandstein und WDVS in MJ/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

In einer ersten Anpassung wird das Material der tragenden Ebene durch Stahlbeton ersetzt. Der U-Wert von  $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  wird beibehalten. Zudem wird auf den Gipsputz verzichtet und der Stahlbeton in Sichtbetonqualität ausgeführt. Der Schichtaufbau der Variante 2 ist in Abbildung 41 dargestellt.

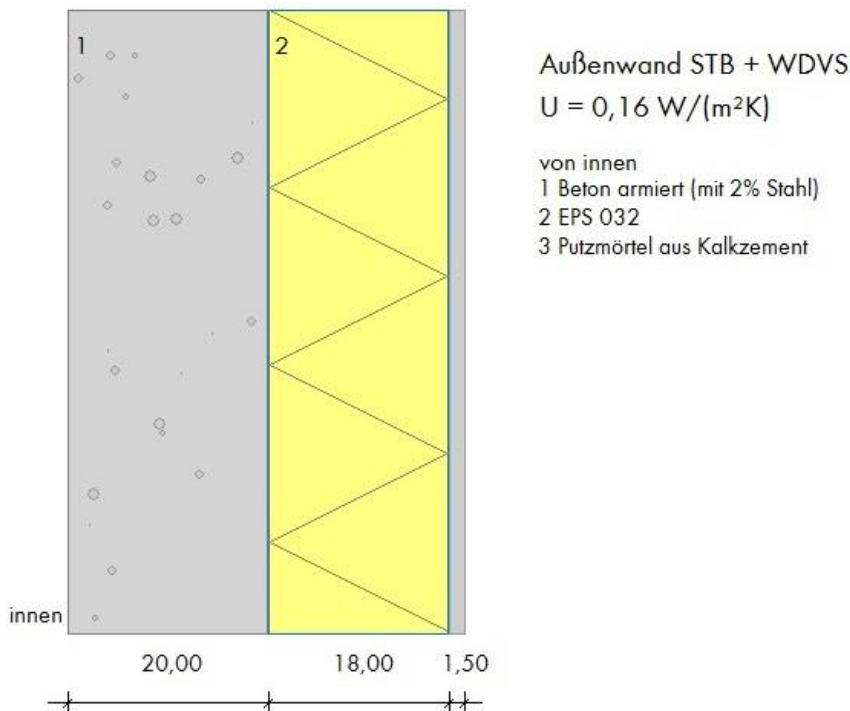


Abbildung 41: Schichtaufbau Außenwand Stahlbeton mit WDVS aus expandiertem Polystyrol (EPS)

In einer zweiten Veränderung wurde ein rein monolithischer Wandaufbau gewählt. Ein ThermoPlan-Ziegel mit Luftkammern bildet zugleich die tragende und die dämmende Schicht. Es wurden bewusst Luftkammern statt Dämmstofffüllungen im Ziegel gewählt, um späteres Recycling durch Sortenreinheit zu vereinfachen. Die Dämmwirkung dieses Luftkammerziegels ist zwar geringfügig schlechter als die eines dämmstoffgefüllten Ziegels, allerdings wird durch den außenliegenden Wärmedamputz ebenso der gewünschte U-Wert von  $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  erreicht. Als Innenputz wird bei dieser Mauerwerkvariante ein Kalk-Putz verwendet, um die Recyclingfähigkeit zu erhalten. Der Schichtaufbau dieser Variante ist in Abbildung 42 dargestellt.

Für die Außenwand aus Stahlbeton werden wie für die Wand aus Kalksandstein zwei verschiedene Varianten des WDVS ökobilanziell untersucht. Ebenso wird der monolithische Wandaufbau mit ThermoPlan-Ziegeln bilanziert (s. Abbildung 43 und Abbildung 44). Wie für den Bauteilaufbau mit Kalksandstein wird für die Variante 2 ein WDVS mit geklebter Dämmung verwendet. Bei der Variante 1 wird das WDVS weiterhin geklebt und gedübelt. Im Vergleich mit den Ökobilanzen des Bauteilaufbaus mit Kalksandstein zeigt sich, dass sowohl das Treibhauspotential als auch der Nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf des Stahlbetons höher sind als bei der Ausführung mit Kalksandstein (vgl. Abbildung 39 und Abbildung 40). Dies ist auf die emissionsreichere und energieintensivere Herstellung insbesondere des Zements und des Bewehrungsstahls zurückzuführen. Ebenso wird deutlich, dass der monolithische Bauteilaufbau im Vergleich mit den Ausführungen mit Kalksandstein mit WDVS und Stahlbeton mit WDVS deutlich niedrigere Werte aufweist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der monolithischen Bauweise die Dämmebene bereits in den Bauteilaufbau integriert ist.

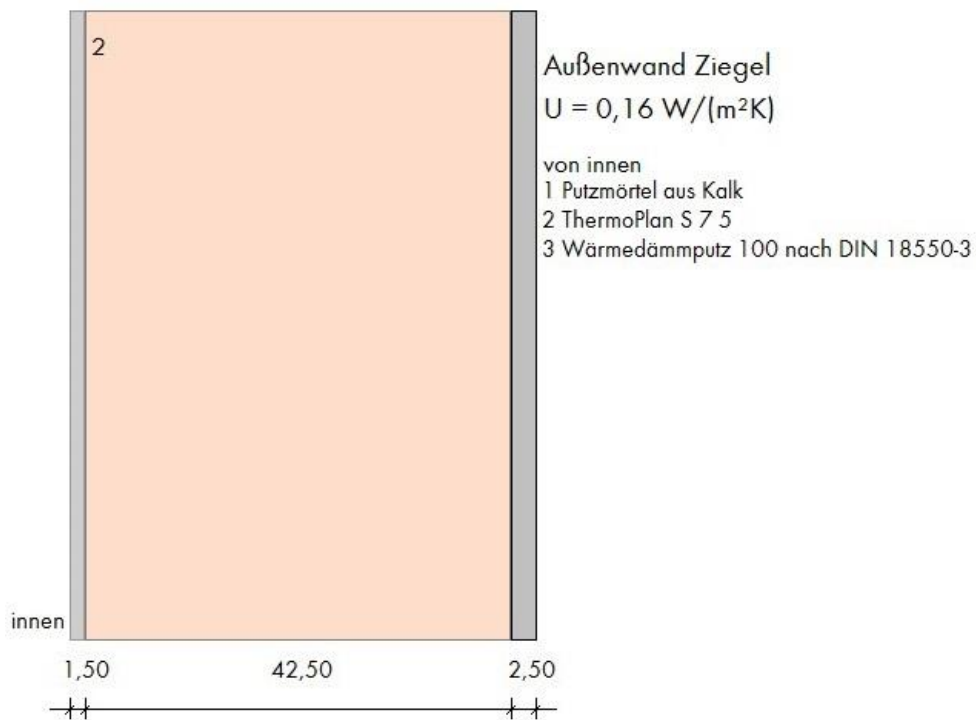


Abbildung 42: Schichtaufbau Außenwand mit ThermoPlan

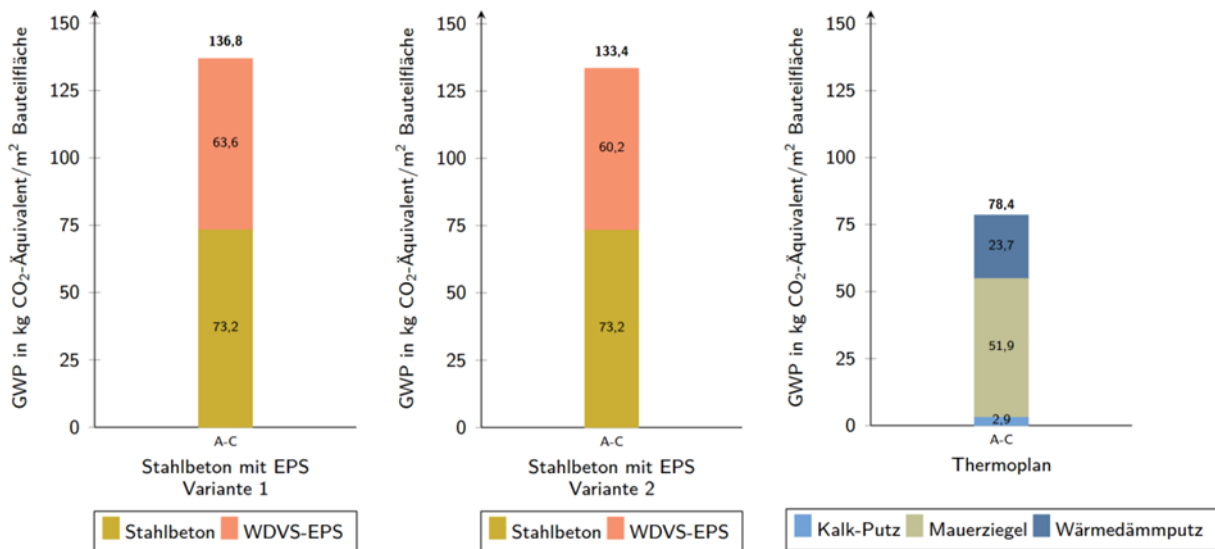


Abbildung 43: Treibhauspotential verschiedener Varianten mit Stahlbeton und EPS sowie ThermoPlan-Ziegel in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

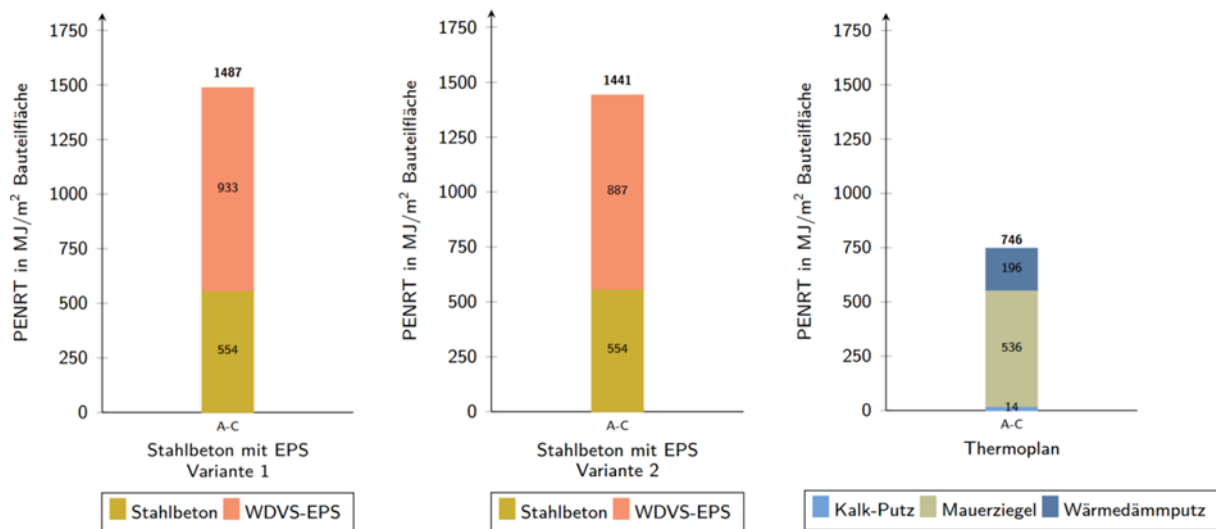


Abbildung 44: Nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf verschiedener Varianten mit Stahlbeton und EPS sowie Thermoplan-Ziegel in MJ/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

Weitere in Deutschland häufig auftretende Außenwandkonstruktionen sind die vorgehängte hinterlüftete Fassade und das zweischalige Mauerwerk. Vorgehängte hinterlüftete Fassaden waren lange Zeit insbesondere größeren Gebäuden vorbehalten, kommen inzwischen aber auch im höherwertigen Einfamilienhausbau zum Einsatz. Für die Fassadenbekleidung existiert eine Vielzahl an möglichen Materialien, von Faserzementplatten über Naturwerkstein bis hin zu Photovoltaikpaneelen, sodass keine allgemeingültigen Aussagen zur Materialität der Außenschale möglich sind (Abbildung 45). In der ökobilanziellen Untersuchung werden jedoch zur besseren Vergleichbarkeit verschiedene Fassadentypen gewählt. Bei der Variante 1 wird als Verkleidungsmaterial Lärchenholz verwendet. Die Variante 2 wird mit Faserzementplatten ausgeführt und die Variante 3 mit einer Aluminiumfassade. Als Dämmmaterial wird für die vorgehängte hinterlüftete Fassade Mineralwolle gewählt. Dies entspricht den Empfehlungen des Fachverbandes Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V. (FVHF 2017: 22). Dadurch ergeben sich folgende Bauteilaufbauten:

- 200 mm Stahlbeton
- 180 mm Mineralwolle (inkl. Unterkonstruktion)
- 40 mm Hinterlüftung
- Drei Fassaden-Varianten:
  - Option 1: 25 mm Lärchenholz
  - Option 2: 8 mm Faserzementplatte
  - Option 3: 1 mm Aluminiumfassade

Das zweischalige Mauerwerk ist insbesondere in Nord- und Nordwestdeutschland weit verbreitet (Abbildung 46). Beide Außenwandkonstruktionen weisen gegenüber den zuvor aufgezeigten Varianten tendenziell höhere Kosten auf, sind hinsichtlich der Recyclingfreundlichkeit aber im Vorteil, da die einzelnen Schichten nicht miteinander verklebt werden. Die Befestigung der Dämmung erfolgt über Dämmstoffhalterungen. Somit ist ein einfacher Rückbau möglich. Aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten spricht gegen die zweischalige Mauerwerkswand insbesondere bei Verwendung einer Klinkerverblendung der sehr hohe, nicht erneuerbare Primärenergieinhalt.

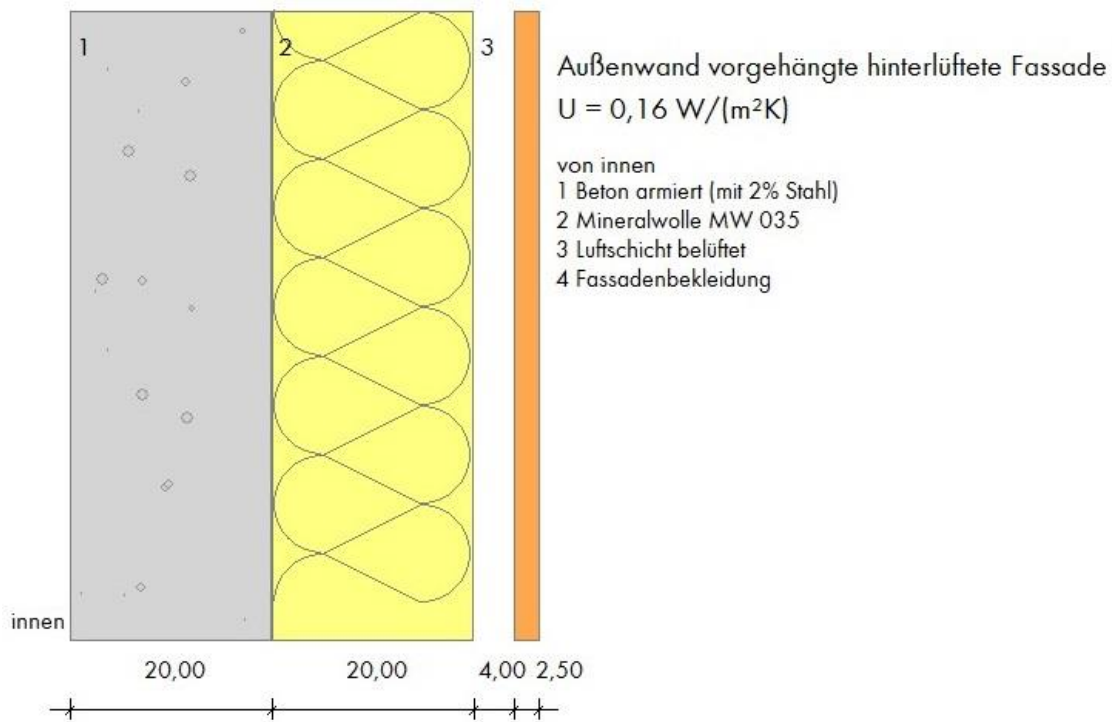


Abbildung 45: Schichtaufbau Außenwand vorgehängte hinterlüftete Fassade

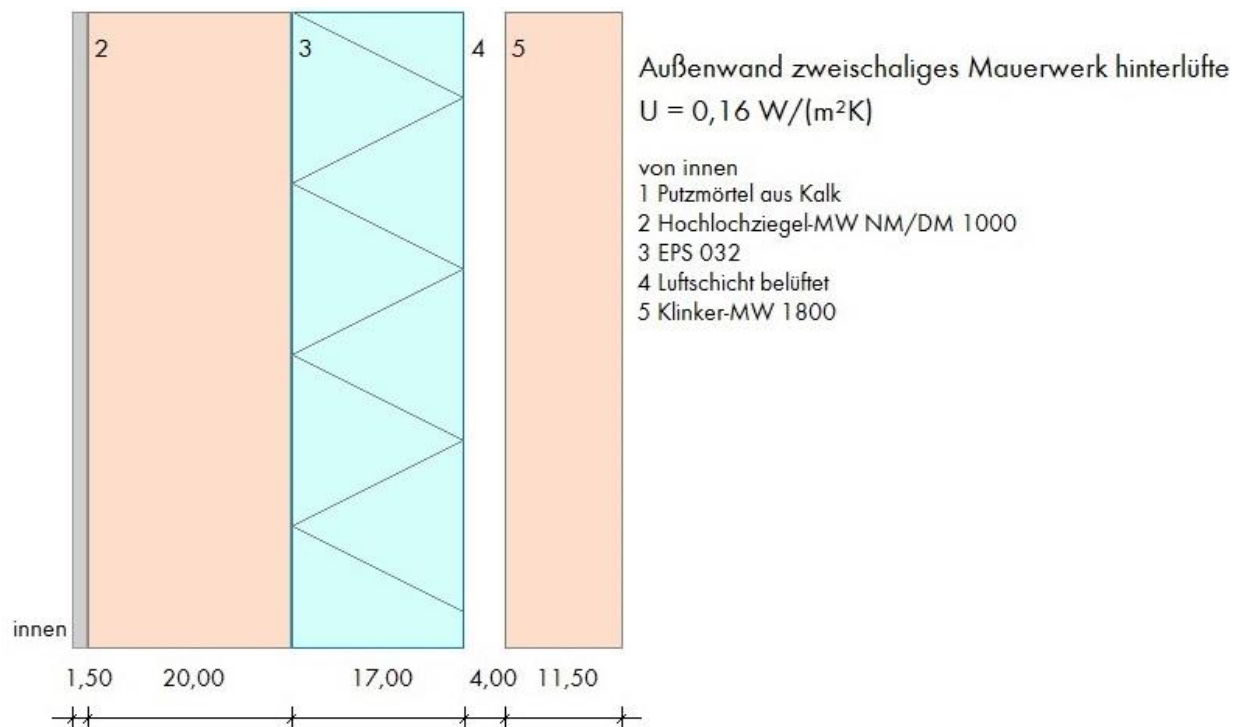


Abbildung 46: Schichtaufbau Außenwand zweischaliges, hinterlüftetes Mauerwerk

Betrachtet man das zweischalige Mauerwerk und die verschiedenen Ausführungsvarianten der vorgehängten hinterlüfteten Fassade ökobilanziell, so zeigt sich, dass das zweischalige Mauerwerk zwar das höchste Treibhauspotential der untersuchten Varianten aufzeigt (s. Abbildung 47). Allerdings sind die Werte immer noch geringer als bei der Variante mit Stahlbeton und WDVS-Dämmung aus EPS (vgl. Abbildung 43). Beim nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf zeigt sich ein anderes Bild. Hier erreicht das zweischalige Mauerwerk die höchsten Werte aller Außenwandvarianten (Abbildung 48). Dies liegt hauptsächlich am hohen Primärenergiebedarf der Vormauerschale, welche aus Klinker gefertigt wird. Zur Klinkerherstellung werden sehr hohe Temperaturen benötigt.

Die Werte des GWP und des PENRT der vorgehängten hinterlüfteten Fassade (Abbildung 47 und Abbildung 48) sind niedriger als bei der Ausführung einer Stahlbetonwand mit WDVS (Abbildung 43 und Abbildung 44). Innerhalb der einzelnen Ausführungsvarianten der vorgehängten hinterlüfteten Fassade erzielt die Faserzementplatte für das Treibhauspotential die niedrigsten Werte aller drei Varianten. Die Variante 1 mit der Fassade aus Lärchenholz erreicht die höchsten Werte. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass die Holzverkleidung innerhalb des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren im Gegensatz zu den anderen Varianten mindestens einmal ausgetauscht werden muss. Beim nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf erreicht die Ausführungsvariante 3 den höchsten Wert. Dies resultiert aus den hohen Temperaturen, die zur Herstellung der Aluminiemelemente nötig sind. Die Faserzementplatte erreicht auch hier die niedrigsten Bilanzierungsergebnisse aller drei Varianten der hinterlüfteten Fassade (Abbildung 48).

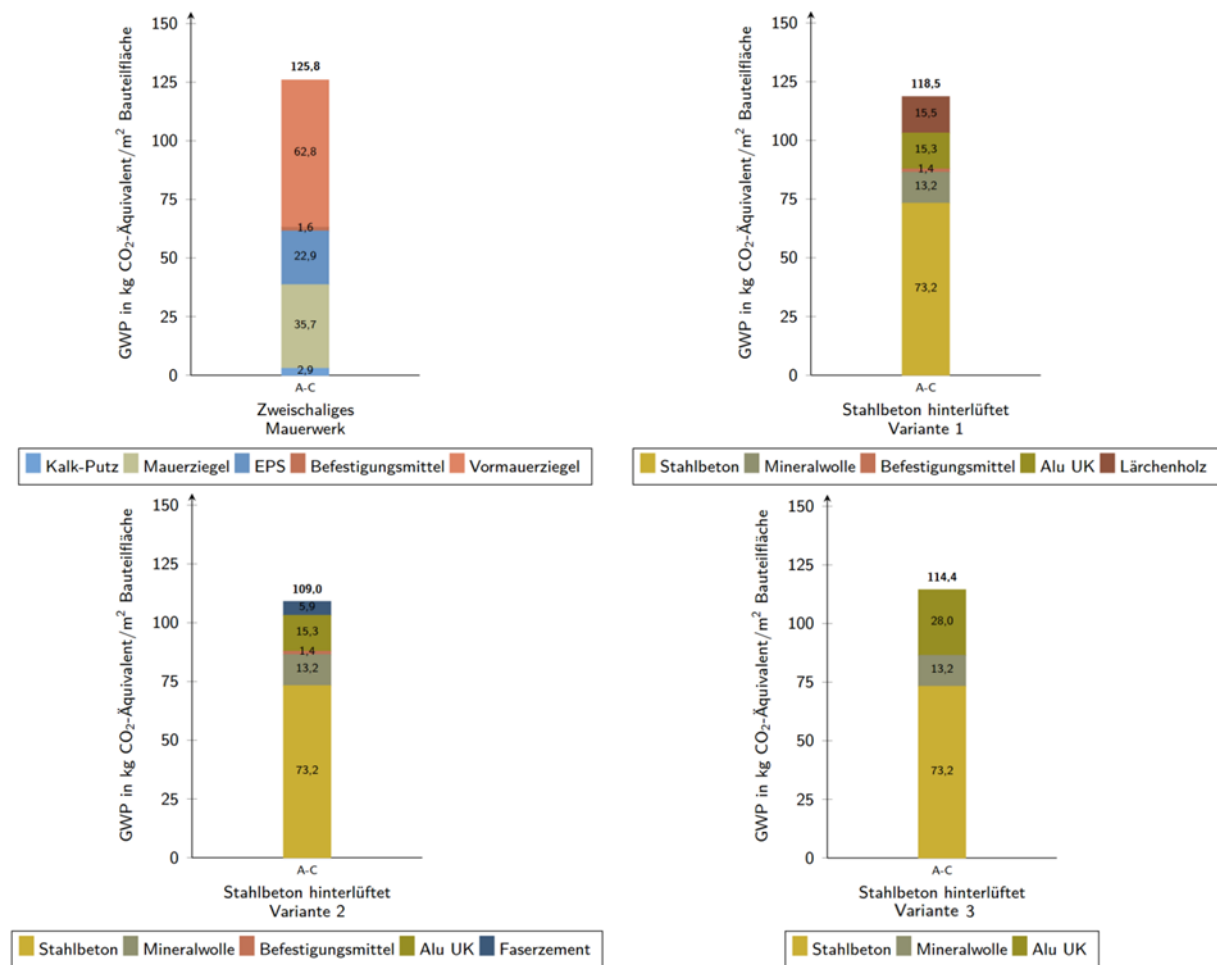


Abbildung 47: Treibhauspotential Zweischaliges Mauerwerk und verschiedener Varianten einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/m<sup>2</sup> Bauteilfläche



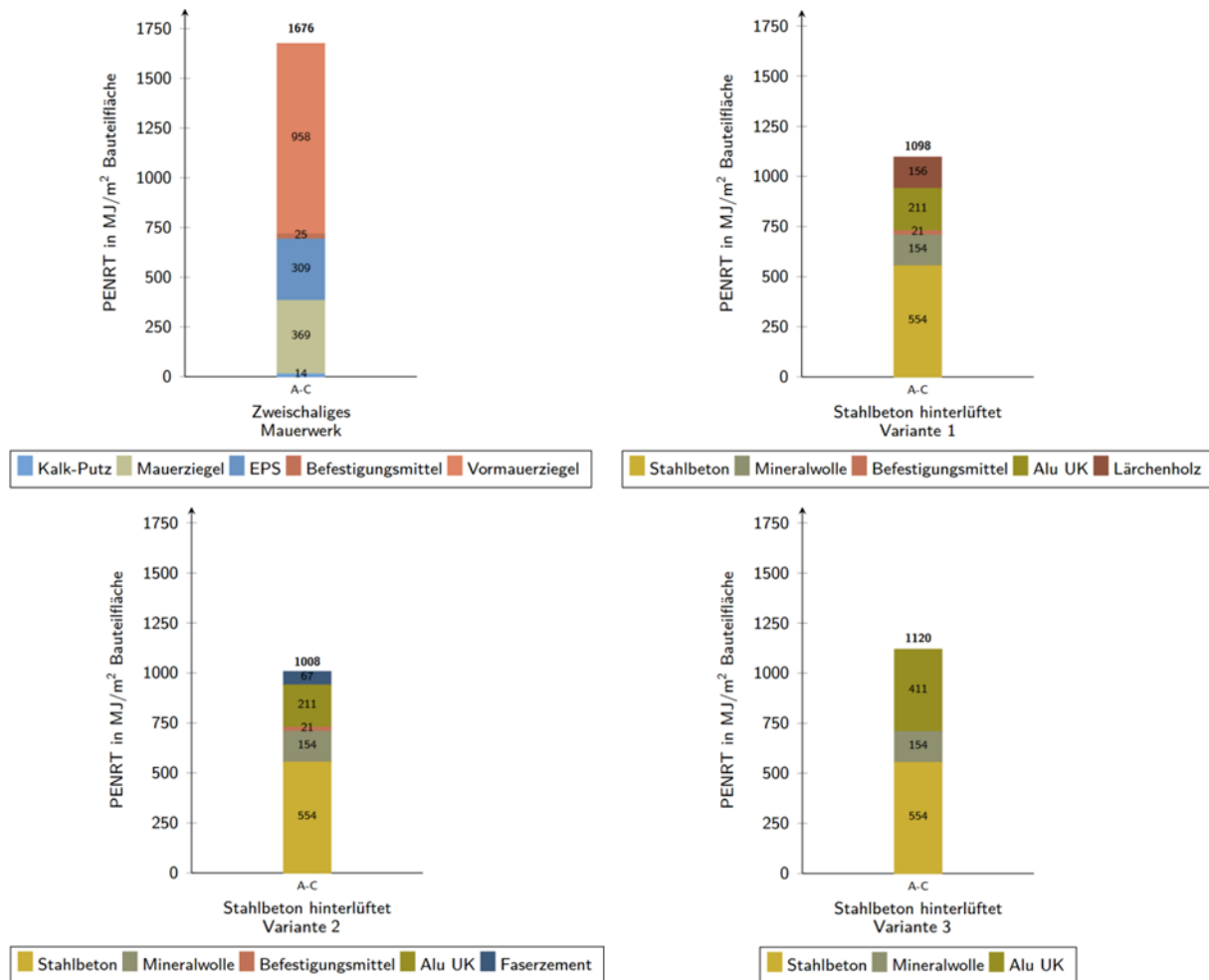
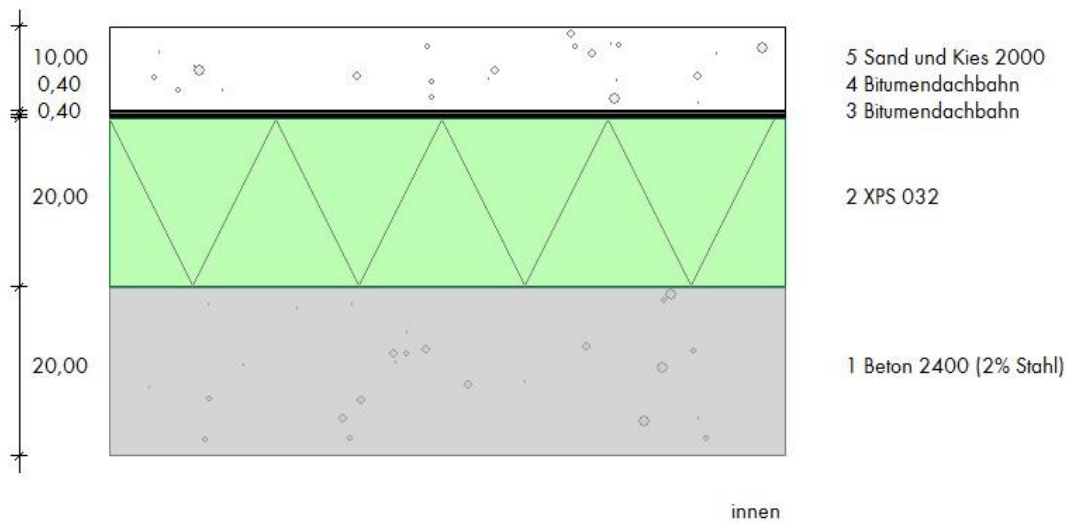


Abbildung 48: Nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf Zweischaliges Mauerwerk und verschiedenen Varianten einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade in MJ/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

Der obere Gebäudeabschluss aller zuvor genannten Massivbauweisen schließt mit der gleichen Flachdachkonstruktion ab. Der Aufbau dieser, bei Massivbauweisen üblichen Konstruktion, ist in Abbildung 49 dargestellt. Als zusätzliche Variante stellt die Ausführung in Holzständerbauweise neben den zuvor genannten Massivbauweisen eine Leichtbauweise dar. In Deutschland sind neben Massivbauweisen vor allem Holzfertigbauweisen zunehmend im Wohnbau vertreten. Holz als Baustoff stellt, unter Einhaltung einiger Planungs- und Ausführungsaspekten wie die Verwendung von FSC-Holz oder das Vermeiden von chemischem Holzschutz, eine Alternative zu energieintensiveren Massivbaustoffen dar und ermöglicht eine leichtere Konstruktion. Abbildung 50 zeigt die gewählte Leichtbauweise, welche ebenso wie die Massivbauweisen den U-Wert von 0,16 W/(m<sup>2</sup>K) erzielt.



Flachdach STB  
 $U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Abbildung 49: Schichtaufbau Flachdach

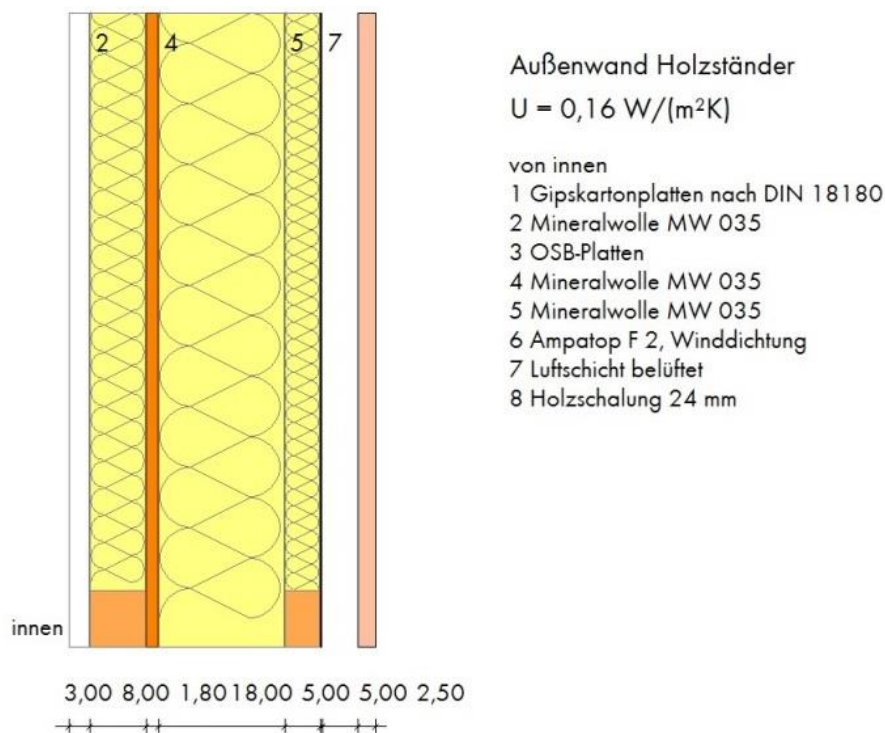


Abbildung 50: Schichtaufbau Außenwand Holzständerbauweise

Die Holzbauweise hat gegenüber den Massivbauweisen auch einen entsprechend angepassten Dachaufbau aus Holz, der den gleichen U-Wert wie das Stahlbeton-Flachdach in Abbildung 49 erzielt. Der Schichtaufbau dieses Flachdaches mit einer Brettstapeldecke ist in Abbildung 51 dargestellt.

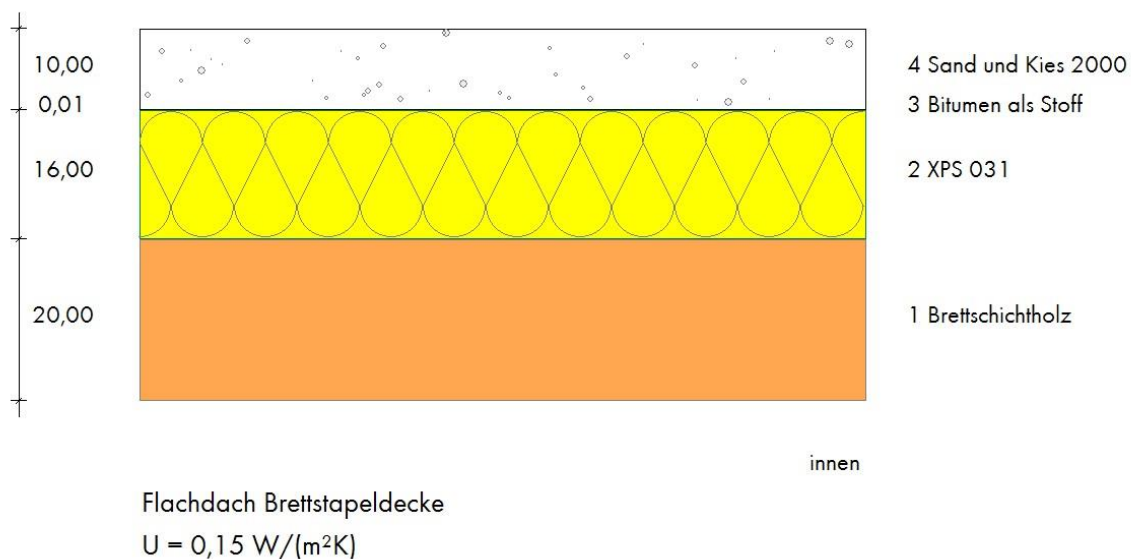


Abbildung 51: Schichtaufbau Flachdach Holzstapelbauweise

## 7.2. Außenanlagen

### 7.2.1. Ökobilanzielle Betrachtung von Wegen und Stellplätzen

Im Rahmen des Projekts KLIBAU werden auch die Außenanlagen der Musterliegenschaft betrachtet. Die Ausführung von Wegen und Stellplätzen wirkt sich auf die Einwirkungen Starkregen und Sommerhitze aus. Werden Wege und Stellplätze versiegelt ausgeführt, dann erhöht sich infolge der verminderten Versickerungsfähigkeit bei Regenereignissen der Oberflächenabfluss. Dies wirkt sich auf die Belastung des öffentlichen Kanalnetzes im Fall von Starkregenereignissen aus und kann in Summe mit zahlreichen anderen Gründen zu starkregeninduziertem Hochwasser führen. Des Weiteren wirkt sich die farbliche Gestaltung von Oberflächen bzw. deren Entsiegelung auch auf den städtischen Wärmeinseleffekt aus. Um die Auswirkungen unterschiedlicher Wege- und Stellplatzausführungen auf die Umweltbelastung beurteilen zu können, werden für verschiedene Ausführungsvarianten Ökobilanzen durchgeführt.

#### Konstruktionen und Durchführung der Ökobilanzierung

In die Betrachtung wurden 7 Konstruktionen einbezogen:

- Asphaltdeckschicht,
- Pflasterdeckschicht,
- Wasserdurchlässige Sickersteine,
- Holzterrasse,
- Kunststoffrasengitter mit wassergebundener Decke,
- Kunststoffrasengitter mit Schotter,
- Kunststoffrasengitter mit durchwachsender Wiese.

Bei allen Ausführungen, die eine Frostschticht benötigen, wurde für diese Kies gemäß DIN 18196:2011-05 verwendet, falls nicht anders beschrieben. Die Dimensionierung der Frostschticht wurde gemäß der Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen Ausgabe 2012 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2012) vorgenommen. Dabei wird von einem Boden mit mittlerer Frostempfindlichkeit (F2) ausgegangen, sowie einer Frostzone mit mittlerer Frosteinwirkung (Zone 2).

Bei Dimensionsangaben mit Spielraum (z.B. 10 – 20 cm) wurde stets ein mittlerer Wert betrachtet. Bei Durchführung der Ökobilanzierung wurden die Lebenszyklusphasen A1 bis A3 (Produktion), B4 (Austausch) sowie C3 und C4 (Abfallverwertung und -entsorgung), gemäß DIN EN 15643-2:2011-05 berücksichtigt.

### **Aufbau mit Asphaltdeckschicht**

Der Aufbau wurde der RStO 12 entnommen (FGSV 2012). Es handelt sich um den Rad- und Gehwegeaufbau in Asphaltbauweise mit Schotter- oder Kiestragschicht gemäß RStO 12, Tafel 6, Zeile 1 und die Bauweise mit Asphaltdecke für Fahrbahnen der Belastungsklasse Bk 0,3 (Abstellfläche PKW-Verkehr) (RStO 12, Tafel 1, Zeile 4). Dementsprechend wurden folgende Aufbauten angesetzt:

#### Fuß-, Radweg (RStO S. 25 - T.6, Z.1)

- 10 cm Asphalt
- 15 cm Schotter- oder Kies-Tragschicht
- 15 cm Frostschuttschicht
- Erdreich

#### PKW-Stellplatz (RStO S. 19 - T.1, Z.3)

- 12 cm Asphalt
- 15 cm Schottertragschicht
- 18 cm Frostschuttschicht
- Erdreich

Die Ergebnisse der Ökobilanz des Aufbaus mit Asphaltdeckschicht sind in der Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28: Ergebnisse der Ökobilanz Aufbau mit Asphaltdeckschicht

Einheit	GWP	PENRT
1 m <sup>2</sup>	in kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent	in MJ
Fußweg/Terrasse	23,3	798,0
Stellplatz	27,1	946,0

### **Aufbau mit Pflastersteinen**

Der Aufbau wurde der RStO 12 entnommen. Es handelt sich um den Rad- und Gehwegeaufbau in Pflasterbauweise mit Schotter- oder Kiestragschicht gemäß RStO 12, Tafel 6, Zeile 1 und die Bauweise mit Pflasterdecke für Fahrbahnen der Belastungsklasse Bk 0,3 auf Schottertragschicht (Abstellfläche PKW-Verkehr) (RStO 12, Tafel 3, Zeile 1). Dementsprechend wurden folgende Aufbauten angesetzt:

#### Fuß-, Radweg (RStO S. 25 - T.6, Z.1)

- 8 cm Pflastersteine
- 4 cm Kies/Splitt/Sand (Bettung)
- 15 cm Kies- oder Schottertragschicht
- 13 cm Frostschuttschicht
- Erdreich

### PKW-Stellplatz (RStO S. 21 - T.3, Z.1)

- 8 cm Pflastersteine
- 4 cm Kies/Splitt/Sand (Bettung)
- 15 cm Kies- oder Schottertragschicht
- 18 cm Frostschutzschicht
- Erdreich

In der Tabelle 29 sind die Ergebnisse der Ökobilanz für den Aufbau mit Pflastersteinen aufgezeigt.

Tabelle 29: Ergebnisse der Ökobilanz Aufbau mit Pflastersteinen

Einheit 1 m <sup>2</sup>	GWP in kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent	PENRT in MJ
Fußweg/Terrasse	27,1	211,2
Stellplatz	27,6	219,9

### **Wasserdurchlässige Sickersteine**

Der Aufbau wurde der RStO 12 entnommen. Es handelt sich um den Rad- und Gehwegeaufbau in Pflasterbauweise mit Schotter- oder Kiestragschicht gemäß RStO 12, Tafel 6, Zeile 1 und die Bauweise mit Pflasterdecke für Fahrbahnen der Belastungsklasse Bk 0,3 auf Schottertragschicht (Abstellfläche PKW-Verkehr) (RStO 12, Tafel 3, Zeile 1). Der Sickerstein basiert auf derselben Umwelt-Produkt-Deklaration (EPD) wie der reguläre Pflasterstein (s.o.), da sie sich in Material und Herstellung nur geringfügig unterscheiden. Da dieser jedoch eine geringere Rohdichte aufweist, wird er in der Bilanz mit 10 % weniger Material berechnet. Es wurden folgende Aufbauten angesetzt:

#### Fuß-, Radweg

- 8 cm Sickerstein
- 4 cm Split
- 15 cm Tragschicht
- 13 cm Frostschutzschicht
- Erdreich

#### PKW-Stellplatz

- 8 cm Sickerstein
- 4 cm Split
- 15 cm Tragschicht
- 18 cm Frostschutzschicht
- Erdreich

In der Tabelle 30 sind die Ergebnisse der Ökobilanz für den Aufbau mit Sickersteinen dargestellt.

Tabelle 30: Ergebnisse der Ökobilanz Aufbau mit Sickersteinen

Einheit	GWP	PENRT
1 m <sup>2</sup>	in kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent	in MJ
Fußweg/Terrasse	25,0	199,8
Stellplatz	25,5	208,4

### 7.2.2. Holzterrasse

Der Aufbau entspricht dem technischen Handbuch für Holzterrassen nach der Tischler Rohstoff e.Gen. und der HolzLand GmbH (HolzLand GmbH 2013). Angenommen wird eine Standardkonstruktion auf ebenem Gelände. Bilanziert wird Lärchenholz, welches in nicht geschützter Umgebung nach rund 10 Jahren ausgetauscht werden muss. Die Bilanzierung wird für 50 Jahre betrachtet und somit das Holz fünffach gewertet. Als Substitution für das erforderliche Wurzelvlies wird PE/PP-Vlies betrachtet, welches dem Gewicht angepasst ist. Dementsprechend wurden folgende Aufbauten angesetzt:

#### Terrasse

- 3,5 cm Planken (Lärche)
- 6,8 cm Tragkonstruktion (Lärche und Stahlwinkel)
- 5 cm Steinplatten als Auflager
- Wurzelvlies
- 22 cm Frostschutz
- Erdreich

In der Tabelle 31 sind die Ergebnisse der Ökobilanz für den Aufbau als Holzterrasse dargestellt.

Tabelle 31: Ergebnisse der Ökobilanz Aufbau als Holzterrasse

Einheit	GWP	PENRT
1 m <sup>2</sup>	in kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent	in MJ
Terrasse	64,2	656,6

### 7.2.3. Rasengitter-Platten

Die Rasengitter-Platten wurden in Material und Systemaufbau nach Herstellerangaben von Hübner-Lee betrachtet (Hübner-Lee GmbH & Co. KG 2019). Die Rasengitter bestehen aus recyceltem Kunststoff (Nückles 2016). Die Daten ökobilanziellen Daten von ebd. (2016) wurden für die Bilanzierung angepasst, um eine Vergleichbarkeit basierend auf Lebenszyklusphasen und Referenzeinheit zu gewährleisten. Als Substitution für das erforderliche Wurzelvlies in allen Systemen wird PE/PP-Vlies betrachtet, welches dem Gewicht angepasst ist. Für die wassergebundene Decke wurde Schotter bilanziert.

Als kultivierendes Füllsubstrat wird bei der durchwachsenen Wiese ein Vegetationssubstrat bilanziert. Da die Zusammensetzung von Substraten stark variiert, wird es als zusätzliche Position gelistet um eine bessere Beurteilung des Systems zu erlauben. Es wurden folgende Aufbauten angesetzt:

### TTE Wassergebundene Decke (z.B. befestigte Wald- und Wanderwege)

- 4 cm Wassergebundene Decke
- 6 cm TTE Gitter mit Splittfüllung
- Feinnetz
- 5 cm Bettung
- Erdboden

### TTE Schotterfläche

- 4 cm Schotter
- 6 cm TTE Gitter mit Schotterfüllung
- Feinnetz
- 5 cm Bettung
- 17cm Schotter
- Erdboden

### TTE Wiese

- 6 cm TTE Gitter mit Füllsubstrat
- Feinnetz
- 5 cm Bettung (Splitt-Oberboden-Gemisch)
- Erdboden

In der Abbildung 52 sind die Aufbauten schematisch dargestellt. In der Tabelle 32 sind die Ergebnisse der Ökobilanz für die TTE-Gitter aufgezeigt.



Abbildung 52: Schematische Aufbauten oberhalb der TTE Gitter der wassergebundenen Decke, Schotterschicht und Wiese , in Anlehnung an Hübner-Lee GmbH & Co. KG (2019)

Tabelle 32: Ergebnisse der Ökobilanz, Aufbau mit TTE-Gittern

Einheit 1 m <sup>2</sup>	GWP in kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent	PENRT in MJ
TTE Wassergebunden	13,5	109,5
TTE Schotterfläche	17,9	178,7
TTE Wiese	12,0	91,2
+ Substrat	-1,6	242,4

### 7.3. Sommerhitze

In Abbildung 53 sind die Ergebnisse der thermischen Simulation für das Kalksandsteinmauerwerk mit Wärmedämmverbundsystem, die Stahlbetonbauweise mit Wärmedämmverbundsystem, das monolithische Mauerwerk und die Holzbauweise dargestellt. Die Ergebnisse sind abhängig von der Masse der Bauteile. Die Stahlbetonbauweise mit einer Rohdichte von 2 500 kg/m<sup>3</sup> erreicht eine geringere Anzahl an Über-temperaturgradstunden pro Jahr und somit eine geringere Erwärmung der Räume als die ursprüngliche Wandausführung aus Kalksandstein mit einer Rohdichte von 1 800 kg/m<sup>3</sup>. Die monolithische Bauweise des Thermoplan Ziegels mit einer Dichte von 600 kg/m<sup>3</sup> erzielt dagegen eine deutlichere Abweichung von den ersten beiden Varianten. Stahlbeton, Kalksandstein und Ziegel weisen alle eine ähnliche Wärmespeicherkapazität von ungefähr 1 000 J/(kg K) auf. Somit kann belegt werden, dass die Abweichung der Über-temperaturgradstunden tatsächlich mit der unterschiedlichen Masse zusammenhängt. Die höchste Anzahl an Über-temperaturgradstunden und somit die stärkste Erwärmung entsteht folglich bei der Holzbauweise. Um im Leichtbau oder bei Holzbauweisen den Nachteil der geringen thermischen Speichermasse auszugleichen, bietet sich der Einsatz von Latentwärmespeichermaterialien an (vgl. Fahrion 2015: 206 ff.). Die Variante 2 erreicht demnach neben der Variante 1 die geringste Anzahl an Über-temperaturgradstunden. Die Variante 3 erreicht eine leicht erhöhte Anzahl an Über-temperaturgradstunden, während die Variante 4 deutlich erhöhte Werte aufweist. Für die Expositions-klasse 1 liegen die Werte dennoch unter dem aus der DIN 4108-2:2013-02 vorgegebenen Grenzwert von 1 200 Kh/a. Bei Betrachtung der Expositions-klasse 2 und 3 wird deutlich, dass die prozentuale Abweichung der Massivbauweisen und der Holzbauweise geringer wird. Dies legt den Schluss nahe, dass der Einfluss der Bauweisen bei zunehmender Temperatur abnimmt.

Das zweischalige Mauerwerk und die vorgehängte hinterlüftete Fassade wurden für die Einwirkung Sommerhitze nicht explizit betrachtet, da auch hier – infolge der guten Wärmedämmung der Außenwandkonstruktionen – der wesentliche Parameter für die Behaglichkeit im Innenraum die wirksame Wärmekapazität der tragenden Innenschale ist.

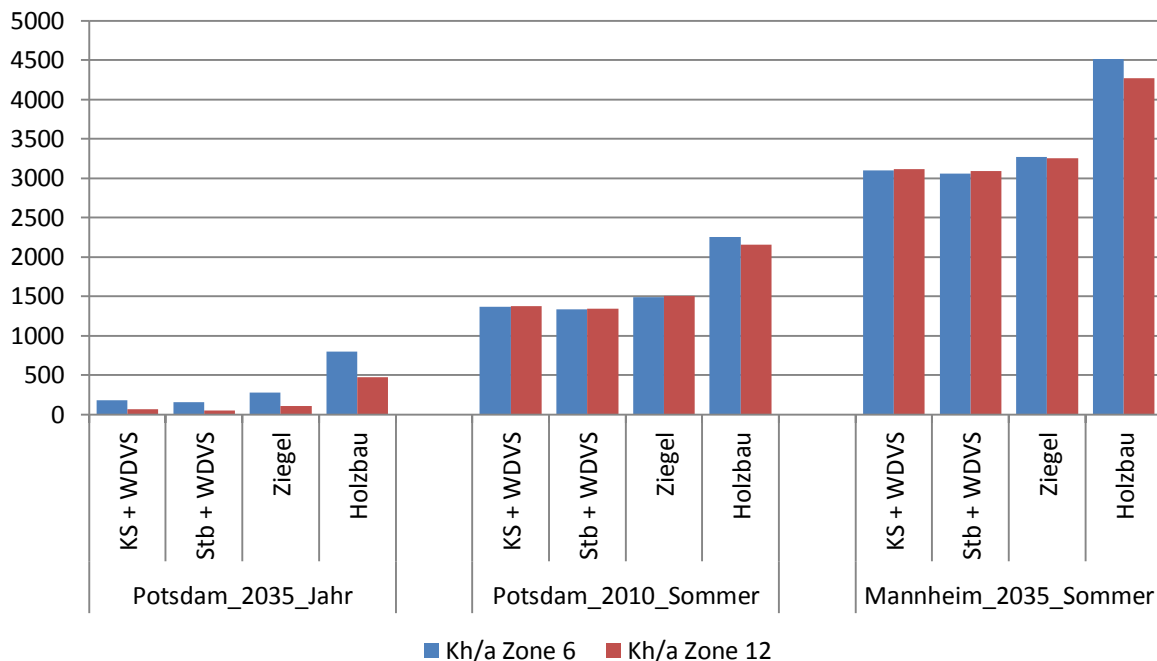


Abbildung 53: Ergebnisse der thermischen Simulation



### 7.3.1. Verglasung

Der solare Strahlungseintrag durch Fensterflächen ist neben der Außentemperatur ein maßgeblicher Parameter, der die Übertemperaturgradstunden beeinflusst. In der Ausgangsvariante wurde eine herkömmliche Dreischeiben-Isolierverglasung mit relativ hohem Energiedurchlassgrad ( $g = 0,59$ ) und hoher Lichttransmission ( $T_{vis} = 0,74$ ) (siehe auch Abbildung 26) gewählt. Es sollte nun überprüft werden, wie sich die Übertemperaturgradstunden verändern, wenn stattdessen ein selektives Sonnenschutzglas ( $g = 0,31$ ;  $T_{vis} = 0,62$ ) eingesetzt wird. Die Verglasungsauswahl hat immer auch Einfluss auf die Tageslichtversorgung der Gebäude, dies wurde über eine Berechnung des Tageslichtfaktors per Tageslichtsimulation für die Basisvariante und die Variante mit Sonnenschutzverglasung veranschaulicht.

#### Tageslichtsimulation

Abbildung 54 zeigt die Ergebnisse der Tageslichtsimulation bei Verwendung der standardmäßigen Dreischeiben-Isolierverglasung. Abbildung 55 zeigt die gleiche Auswertung bei Verwendung der beschriebenen Dreischeiben-Isolierverglasung mit Sonnenschutzbeschichtung auf der Innenseite der Außenscheibe. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss bezüglich der Tageslichtversorgung im Innenraum relativ gering ist. Das ist auch darauf zurückzuführen, dass die Tageslichttransmission des Sonnenschutzglases nur 16 % geringer ist als die der Standardverglasung. Gerade in den ausgewerteten Zonen 12 und 6 ist die Tageslichtversorgung sehr hoch, der durchschnittliche Tageslichtfaktor liegt in Zone 6 bei 4 % mit Sonnenschutzverglasung und bei 5 % mit Standardverglasung. In den Räumen im Nordwesten des Gebäudes ist die Tageslichtversorgung in beiden Varianten sehr gering, was auch durch die Geometrie (Fensterhöhe 58,5 cm bzw. 63,5 cm) und Brüstungshöhe (1,65 m) der dort eingebauten Fenster bedingt ist.

Gemäß DIN 5034-1:2011-07 wird der Tageslichtquotient auf einer horizontalen Bezugsebene in einer Höhe von 0,85 m über dem Fußboden gemessen. Für Wohnräume sollte der Tageslichtquotient in halber Raumtiefe und in 1 m Abstand von den beiden Seitenwänden im Mittel wenigstens 0,9 % betragen. Am ungünstigsten dieser Punkte sollte er wenigstens 0,75 % oder in Wohnräumen mit Fenstern in zwei aneinander grenzenden Wänden mindestens 1 % betragen. Daher wurde für die beiden Varianten eine Auswertung mit 1 % Tageslichtfaktor herangezogen. In den beiden Abbildungen sind die Flächen mit Tageslichtfaktor  $> 1 \%$  in rot eingefärbt. Mit Sonnenschutzverglasung wird dieser Grenzwert in Zone 6 nur in Eckenbereichen nahe der Wände unterschritten und der Raum weist folglich eine mehr als ausreichende Tageslichtversorgung auf.

Tageslichtfaktor, %

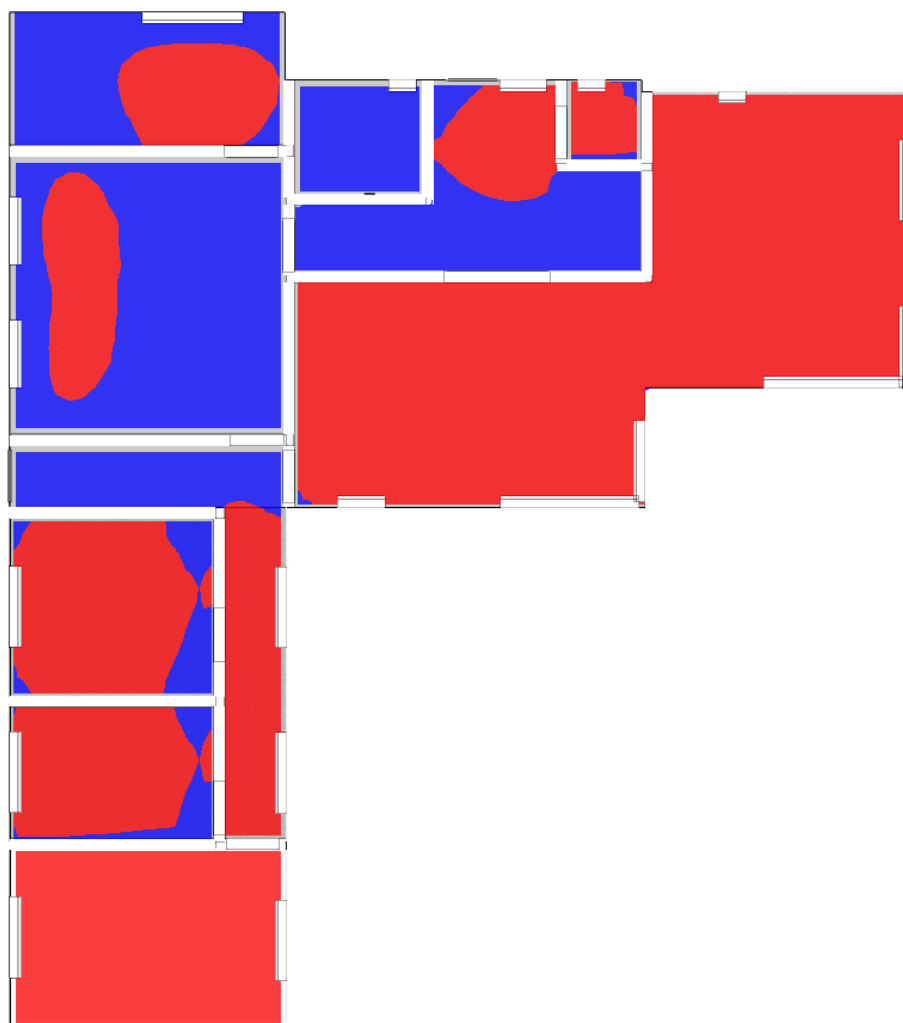
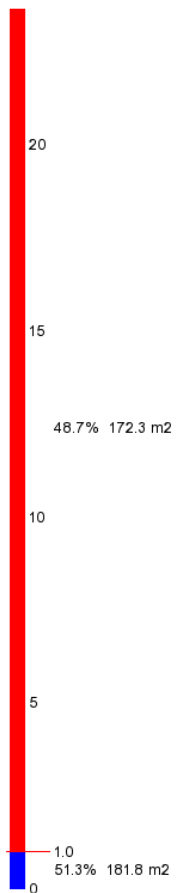


Abbildung 54: Tageslichtfaktor für die Standardverglasung

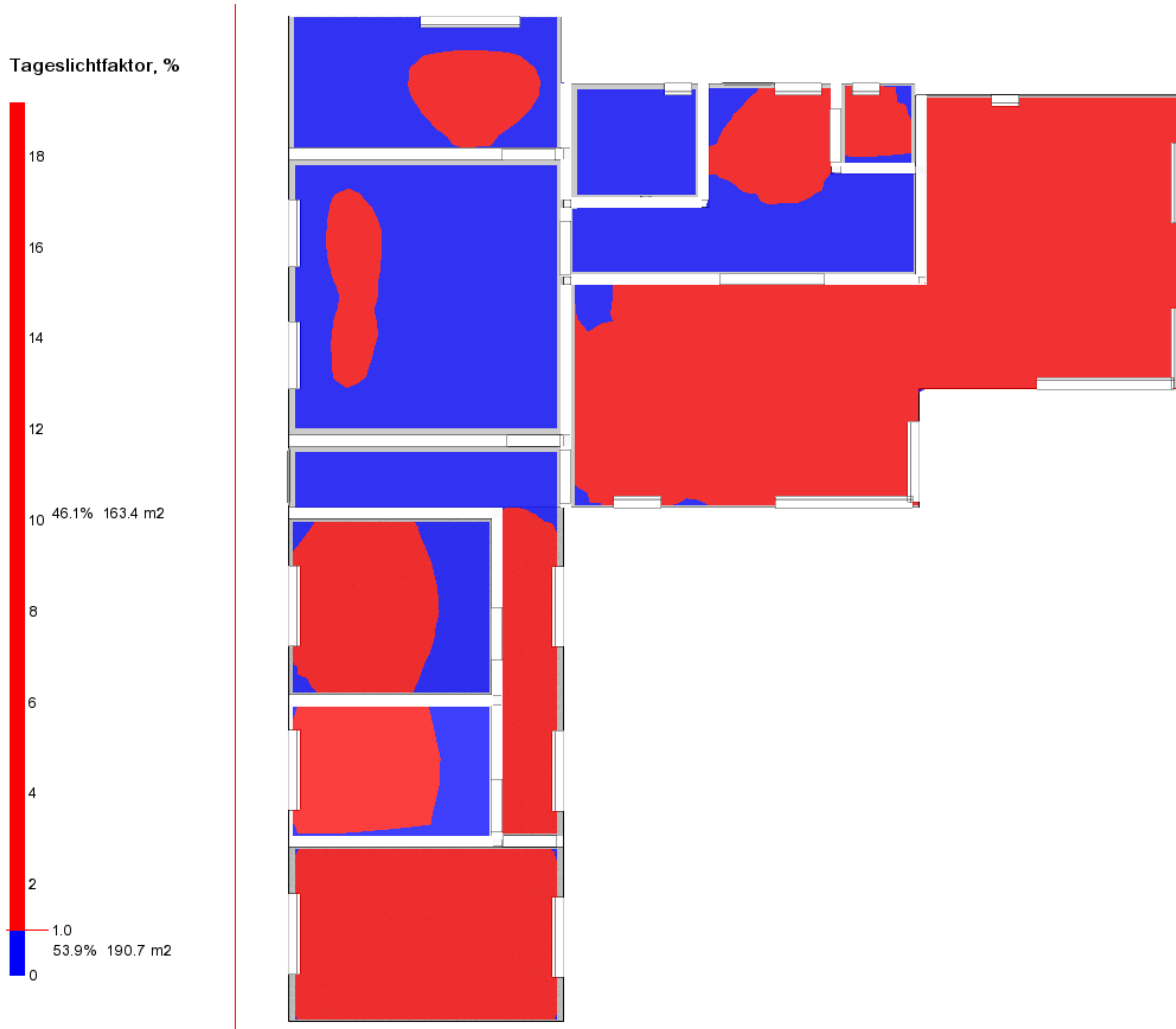


Abbildung 55: Tageslichtfaktor für die Sonnenschutzverglasung

### Thermische Simulation

In Bezug auf die Übertemperaturgradstunden ist bei Verwendung der genannten Sonnenschutzverglasung hingegen ein deutlicherer Unterschied zu erkennen. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 56 dargestellt. Für den Wetterdatensatz Potsdam 2035 Jahr (Expositionsklasse 1) konnten die Übertemperaturgradstunden auf vollkommen unkritische Werte reduziert werden. In der Variante mit Stahlbeton - Außenwänden war dies etwa eine Reduktion von 153 Kh/a auf 10 Kh/a und in der Holzbauvariante von 797 Kh/a auf 190 Kh/a in Zone 6. In den Expositionsklassen 2 und 3 reduzierten sich die Übertemperaturgradstunden auf 40 % - 52 % der Grundvarianten. So kann mit Sonnenschutzverglasung die Anforderung des sommerlichen Wärmeschutzes gemäß DIN 4108-2:2013-02 von maximal 1200 Kh/a für alle Bauweisen in der Expositionsklasse 2 eingehalten werden. Es zeigte sich auch, dass die prozentuale Reduktion der Übertemperaturgradstunden für die massiven Bauweisen etwas höher ausfallen als in den Holzbau - Varianten (s. Abbildung 57).

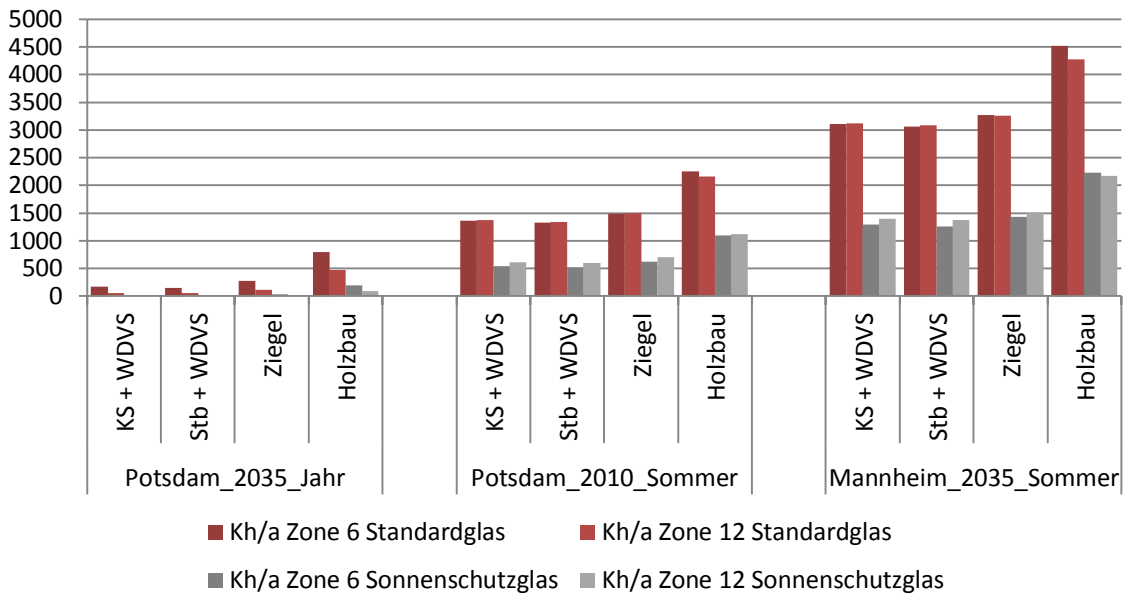


Abbildung 56: Übertemperaturgradstunden in Kh/a mit/ohne Sonnenschutzverglasung

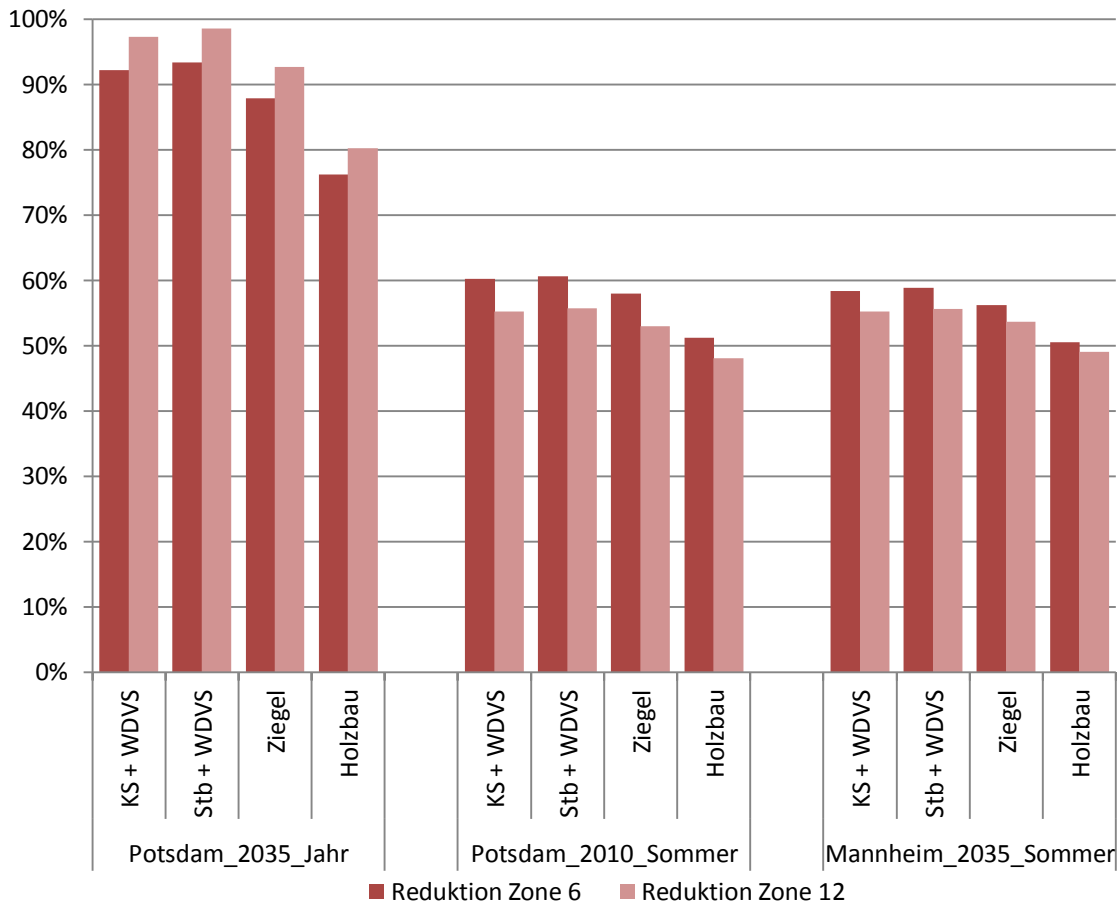


Abbildung 57: Prozentuale Reduktion auf Grund der Sonnenschutzverglasung

### 7.3.2. Sonnenschutz

Wie weit Tageslicht in die Räume eindringt, hängt wesentlich von der Sturzhöhe der Fenster ab. In DIN V 18599-4:2018-09 wird angegeben, dass die Tiefe der tageslichtversorgten Zone  $a_{TL,max}$  etwa dem 2,5-fachen der Differenz zwischen Sturzhöhe  $h_{St}$  und Höhe der Nutzebene  $h_{Ne}$  entspricht (Gl. 2). Die Höhe der Nutzebene wird für die meisten Nutzungsprofile nach DIN V 18599-10:2018-09 zu 0,8 m definiert (z.B. Büro, Hotelzimmer, Kantine, Restaurant). In DIN 5034-1:2011-07 und DIN EN 17037:2019-03 wird die Bezugsebene zur Ermittlung der Tageslichtversorgung jeweils auf 0,85 m definiert. Für gängige lichte Raumhöhen im Wohnungsbereich von 2,5 m und Sturzhöhen von ca. 2,2 m würde der ausreichend tageslichtversorgte Bereich bis in eine Raumtiefe von etwa 3,5 m reichen. Bei einer Sturzhöhe von 2,4 m würde sich der ausreichend mit Tageslicht versorgte Bereich bis in eine Tiefe von 4,0 m erstrecken. Fenster sollten daher so hoch wie möglich eingebaut werden, um eine bessere Verteilung des Tageslichts im Raum zu gewährleisten und/oder die Raumtiefen entsprechen angepasst werden (Abbildung 58)

$$a_{TL,max} = 2,5 \cdot (h_{St} - h_{Ne}) \quad (\text{Gl. 2})$$

mit  
 $a_{TL,max}$  Tiefe der tageslichtversorgten Zone  
 $h_{St}$  Sturzhöhe  
 $h_{Ne}$  Höhe der Nutzebene

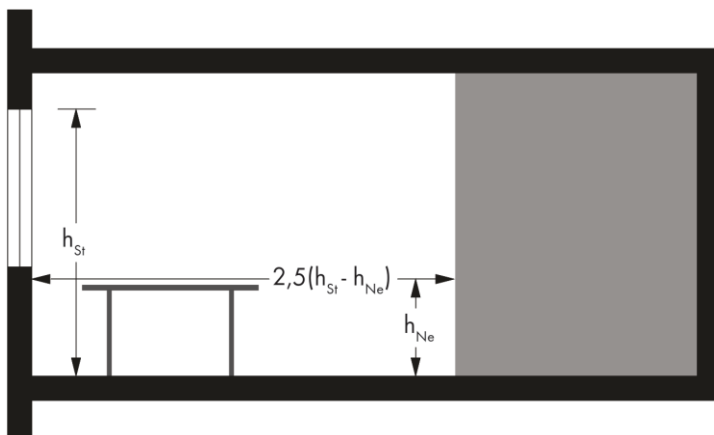


Abbildung 58: Raumtiefe in Abhängigkeit der Sturzhöhe zur Tageslichtversorgung, nach DIN V 18599-4:2018-09

Für Räume mit Fenstern an nur einer Fassade kann nach Robinson/Selkowitz (2013) überschlägig die benötigte Fensterfläche bestimmt werden. Die nachfolgenden Formeln (Gl. 3 und Gl. 4 ersetzen keine detaillierte Planung, geben aber grobe Anhaltswerte.

$$A_{g,net} = \frac{2 * DF_{Avg} * A_s * (1 - R_{mean})}{\tau_w \theta} \quad (\text{Gl. 3})$$

mit

$DF_{Avg}$  durchschnittlicher Tageslichtfaktor (2 für gut belichtete Räume)  
 $\tau_w$  Lichttransmission der Verglasung  
 $A_{g,net}$  Fensterfläche (ohne Rahmen; in m<sup>2</sup>)  
 $\theta$  vertikaler Winkel zwischen der Mitte des Fensters und der Nachbarbebauung (90° wenn keine Verbauung vorhanden, siehe Abbildung 59)  
 $A_s$  Summe der Raumumgebenden Oberflächen (Decke, Boden, Wände in m<sup>2</sup>)  
 $R_{mean}$  durchschnittlicher Reflektionsgrad der Oberflächen (0,5 für Standard Oberflächen)

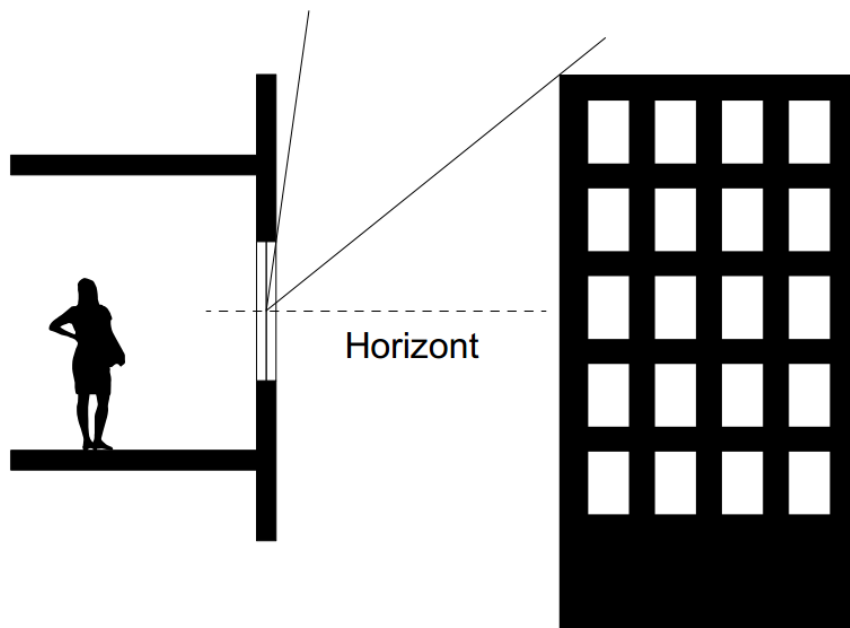


Abbildung 59: Vertikaler Winkel zwischen der Mitte des Fensters und der Nachbarbebauung

Für Fenster ohne Verbauung und mit einem Transmissionsgrad von 0,8 kann über folgende Formel eine Umrechnung auf das Rohbaumaß für einen gewünschten durchschnittlichen Tageslichtfaktor von 2 erfolgen.

$$A_{g,rohbau} = \frac{2,5 * A_s}{63} \quad (\text{Gl. 4})$$

Fensterflächen unter einer Höhe von 0,85 m sind in der Regel nur bedingt für die Tageslichtversorgung von Nutzen, da der Bereich der Sehaufgabe normalerweise bei etwa 0,85 m Höhe liegt. Einfallendes Licht das unterhalb dieser Ebene eintrifft muss folglich mindestens zwei Mal reflektiert werden. (1. Boden, 2. Decke). Setzt man Standardreflektionsgrade an (Boden: 0,2, Decke: 0,7) so kommt nur zirka 14 % des Lichtes auf der Arbeitsebene an, der Wärmeeintrag jedoch bleibt bei 100 %.

### Sonnenschutz

Zusätzlich zu einer angemessenen Fenstergröße hat die Wahl des Sonnenschutzes erheblichen Einfluss auf die Verglasungswahl beziehungsweise die Überhitzung in Gebäuden. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen außen- und innenliegenden Systemen.

#### Außenliegende Systeme

Außenliegende Systeme halten die Sonnenstrahlung bereits vor dem Auftreffen auf das Fenster auf und sind daher wirkungsvoller im Schutz vor Überhitzung als innenliegende oder zwischen den Scheiben liegende Systeme. Der Sonnenschutz ist bei geöffneten Fenster weiterhin gegeben, die Lüftungseffektivität wird aber bei geschlossenem Sonnenschutz durch den erhöhten Strömungswiderstand je nach System deutlich verringert. Zudem wird dadurch erwärmte Luft in das Gebäude transportiert. Ein weiterer Vorteil bei motorisch betriebenen Systemen ist die Regelbarkeit und die Möglichkeit der nutzerunabhängigen Steuerung. Außenliegende Systeme sind allerdings windanfällig und müssen je nach System bei starken Böen eingefahren werden. Allerdings existieren auch windstabile Systeme wie Markisen mit Zip-Führung, die bis 24,4 m/s (Beaufort 9, Sturm) oder windstabile Jalousien die bis 25 m/s (Beaufort 10, schwerer Sturm) zugelassen sind.

### *Außenjalousien (Raffstores)*

Eine häufig eingesetzte Form des außenliegenden Sonnenschutzes sind Außenjalousien oder auch Raffstore genannt. Diese bestehen aus horizontalen, gewölbten Aluminiumlamellen. Der Sonnenschutz kann vollständig geschlossen, geöffnet und die Lamellen nach Wunsch oder Sonnenstand geneigt werden. So ist in der Regel der Schutz vor Überhitzung und gleichzeitig eine Sichtverbindung nach Außen gegeben. Auf Bedürfnisse zum Sichtschutz kann je nach Wunsch reagiert werden. Manche Raffstores bieten auch die Möglichkeit, den unteren Teil für den Blendschutz geschlossen zu halten, während im oberen Teil die Lamellen teilweise geöffnet sind, um lichtlenkend weiterhin eine ausreichende Tageslichtversorgung zu gewährleisten.

Abminderungsfaktor  $F_c$ :

Nach Herstellerdaten je nach Farbe

$F_c \approx 0,11 - 0,19$  (bei g-Wert von  $g = 0,63$ ; Lamellenneigungswinkel  $45^\circ$ )

gemäß DIN 4108-2:2013-02

bei g-Wert  $> 0,40$  Dreischeiben - Isolierverglasung:

$F_c = 0,25$

### *Markisen*

Markisen oder auch Screens bestehen aus wetterfesten Stoffen, u.a. mit PVC überzogene Glasfaser oder mit PVC beschichtetes Polyester, die entweder teilweise oder vollständig auf- und zugefahren werden können. Eine sonnenstandsangepasste Steuerung wie bei Raffstores ist hier nicht möglich. Die Durchsicht ist nur im geringen Umfang gegeben, der Sichtschutz durchschnittlich. Je nach Stoff kann der Schutz vor Überhitzung deutlich variieren (s. Angaben zum Abminderungsfaktor). Die Abminderungsfaktoren berücksichtigen jedoch nicht, dass bei Fensterlüftung mit geschlossenem Sonnenschutz durch die Markise erwärmte Luft ins Gebäudeinnere eingebracht wird. Im Falle, dass bei geschlossenem Sonnenschutz häufig gelüftet werden muss, ist die Eignung von dunklen Markisen im Einzelfall detailliert zu untersuchen.

Markisen sind je nach Bauart in der Regel etwas windanfälliger als Außenjalousien.

Abminderungsfaktor  $F_c$ :

Nach Herstellerdaten je nach Farbe und Material

$F_c \approx 0,14 - 0,27$  (bei g-Wert von  $g = 0,63$ )

gemäß DIN 4108-2:2013-02

bei g-Wert  $> 0,40$  Dreischeiben - Isolierverglasung

$F_c = 0,25$  parallel zur Verglasung

$F_c = 0,50$  Markisen allgemein

### *Zwischen den Fensterscheiben liegende Sonnenschutzvorrichtungen*

Da der Sonnenschutz im Scheibenzwischenraum angebracht ist, werden diese vom Fensterhersteller eingebaut. Reparaturen sind aus diesem Grund nicht oder nur sehr schwer möglich. Im Schadensfall müsste das gesamte Glas ausgebaut bzw. ersetzt werden. Allerdings ist der Sonnenschutz nicht windanfällig und es wird kein zusätzlicher Platz für Sonnenschutz in Anspruch genommen.

### Innenliegende Sonnenschutzvorrichtungen

Innenliegende Sonnenschutzvorrichtungen gibt es in diversen Ausführungen und Arten auf dem Markt. Meist sind sie leicht und günstig auch nachträglich zu installieren. Allerdings weisen innenliegende Sonnenschutzsysteme einen schlechteren Schutz vor Überhitzung auf, da die Solarstrahlung nur zum Teil wieder durch die Verglasung nach Außen reflektiert werden kann. Zudem ist bei geöffnetem Fenster der Blend- und Sonnenschutz meist nicht mehr gegeben.

#### *Vertikallamellen/Vertikaljalousien*

Vertikaljalousien bestehen aus mehreren Stofflamellen, die an einer Schiene angebracht sind. Die Stofflamellen können um ihre Längsachse gedreht und entsprechend der Sonneneinstrahlung ausgerichtet werden. Dies ist vor allem für Ost- und Westfassaden nützlich, da hier die Einfallswinkel schräg und relativ tief sind. Durch geeignetes Drehen der Lamellen bleibt die Sichtverbindung nach Außen bei gleichzeitigem Blendschutz erhalten.

#### *Innenliegende Screens/Rollos*

Innenliegende Screens weisen ähnliche Nachteile wie außenliegende Markisen auf. So ist auch hier die Verstellbarkeit auf das teilweise oder vollständige auf- und zufahren reduziert. Rollos werden auch mit metallbeschichteten Folien an Stelle von Stoffen angeboten. Diese sind an der Außenseite (zum Fenster hin) mit einer hochreflektiven Schicht überzogen, was in einer deutlichen Verbesserungen der thermischen Eigenschaften resultiert.

Abminderungsfaktor  $F_c$ :

Nach Herstellerdaten je nach Farbe und Material

$F_c$  bis 0,47 (bei g-Wert von  $g = 0,32$ ) bei metallisierten Screens möglich

$F_c$  bis 0,44 (bei g-Wert von  $g = 0,25$ ) bei beschichteten hellen Stoffen

gemäß DIN 4108-2:2013-02

bei g-Wert  $> 0,40$  Dreischeiben - Isolierverglasung

$F_c = 0,7 - 0,8$  je nach Farbe oder Transparenz

### **7.3.3. Kühlen in Einfamilienhäusern**

#### **Natürliche Lüftung über automatisch öffnbare Elemente**

Eine Möglichkeit zur passiven Kühlung des Gebäudes besteht durch die Nutzung von natürlicher Lüftung durch Fensteröffnung. Allerdings werden Fenster aus Sicherheitsbedenken außerhalb der Anwesenheitszeiten der Bewohner oder nachts nicht geöffnet. Abhilfe schaffen hier einbruchhemmende, automatisch öffnbare Elemente. In dieser Variante wurde angenommen, dass diese Elemente neben jedem Fenster angeordnet sind und die Breite der Elemente etwa einem Viertel des zugehörigen Fensters entspricht. Die aerodynamischen Eigenschaften der Elemente wurden durch Widerstandsbeiwerte berücksichtigt. Zudem wurde eine Steuerung ähnlich der Lüftungssteuerung nach DIN 4108-2:2013-02 hinterlegt. Die Simulationsergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Standardnachweis. Für den Datensatz Potsdam 2010 Sommer haben sich die Ergebnisse um 56 % und für den Datensatz Mannheim 2035 Sommer um 41 % verbessert.

#### **Adiabate Kühlung im Lüftungsgerät**

Eine weitere Möglichkeit zur Kühlung von Gebäuden stellt die indirekte adiabate Kühlung dar. Hierbei wird die mechanische Abluft vor dem Wärmetauscher mit Wasser besprüht, das in der Folge verdunstet und somit den Luftstrom kühlt. Im Nachgang kühlt der nun kalte Abluftstrom den Zuluftstrom indirekt über den Wärmetauscher. Der Wasserverbrauch für das Einfamilienhaus liegt bei diesem System etwa bei 11 -



12 l/d wenn man von einer Befeuchtungszeit von 8h ausgeht. Damit kann beispielsweise die Außenluft von 35 °C auf eine angenehme Zulufttemperatur von 24 °C gebracht werden. Zur Befeuchtung kann normales Trinkwasser benutzt werden.

Aktuell werden solche Geräte vor allem bei größeren Anlagen eingesetzt. Dies liegt unter anderem daran, dass die Befeuchter relativ wartungsintensiv sind. In Einfamilienhäusern mit kleinen Kompaktlüftungsanlagen werden sie aus Platzgründen bisher nicht verbaut. Dennoch zeigt sich in den Simulationsergebnissen das Potential dieses Systems. So konnten die Übertemperaturgradstunden um ca. 62 % für den Datensatz Potsdam\_2010\_Sommer und um 68 % für den Datensatz Mannheim\_2035\_Sommer reduziert werden.

### **Kühlung mit Wärmepumpen**

Die in diesem Abschnitt getroffenen Aussagen orientieren sich an den Wartungs- und Planungshandbüchern der Hersteller. Im Allgemeinen werden bei Kühlung mit Wärmepumpen zwei Systemarten unterschieden:

1. Passive Kühlung (ausschließlich Nutzung der Energiequelle (Erdreich oder Wasser)),
2. Aktive Kühlung (zusätzlicher Betrieb der Wärmepumpe bzw. des Verdichters).

#### Passive Kühlung (natural cooling)

Wird das Gebäude über eine Wärmepumpe mit der Energiequelle Erdkollektor oder Grundwasser beheizt (s. Abbildung 60) so kann die Kühlung rein passiv erfolgen. In diesem Fall, der in Abbildung 61 dargestellt ist, wird das Wasser in den Heizungsleitungen über einen zusätzlichen Wärmetauscher durch das kältere Sole/Wassergemisch der Kollektoren bzw. des Grundwassers gekühlt. Die Wärmepumpe ist hierfür nicht in Betrieb. Es sind lediglich zwei Umwälzpumpen in Betrieb. Die Wärmepumpe schaltet sich nur zur Warmwasserbereitung ein, falls das Anlagenkonzept dies vorsieht. Die Warmwasserbereitung gestaltet sich dann auch etwas effizienter, da die Wärmequellentemperatur höher ist.

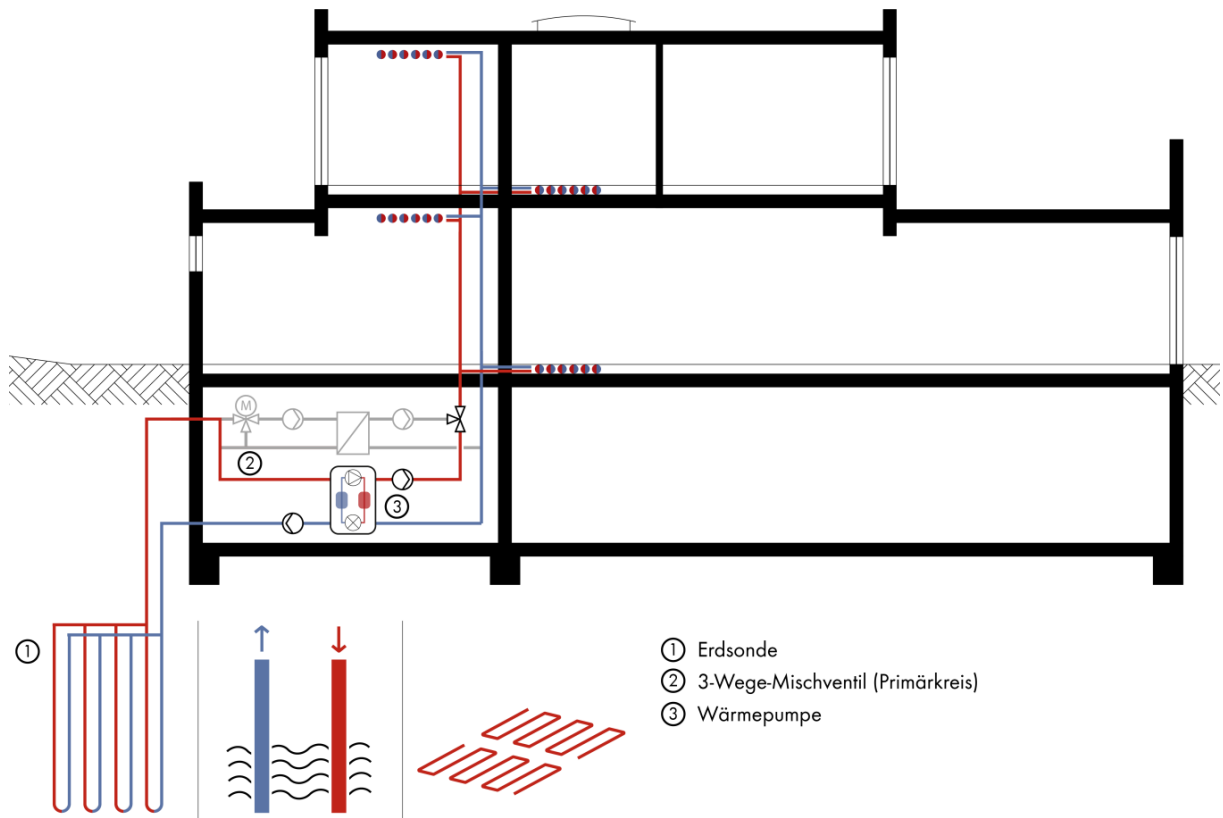


Abbildung 60: Systemskizze zur Verwendung der Wärmepumpe als Heizung

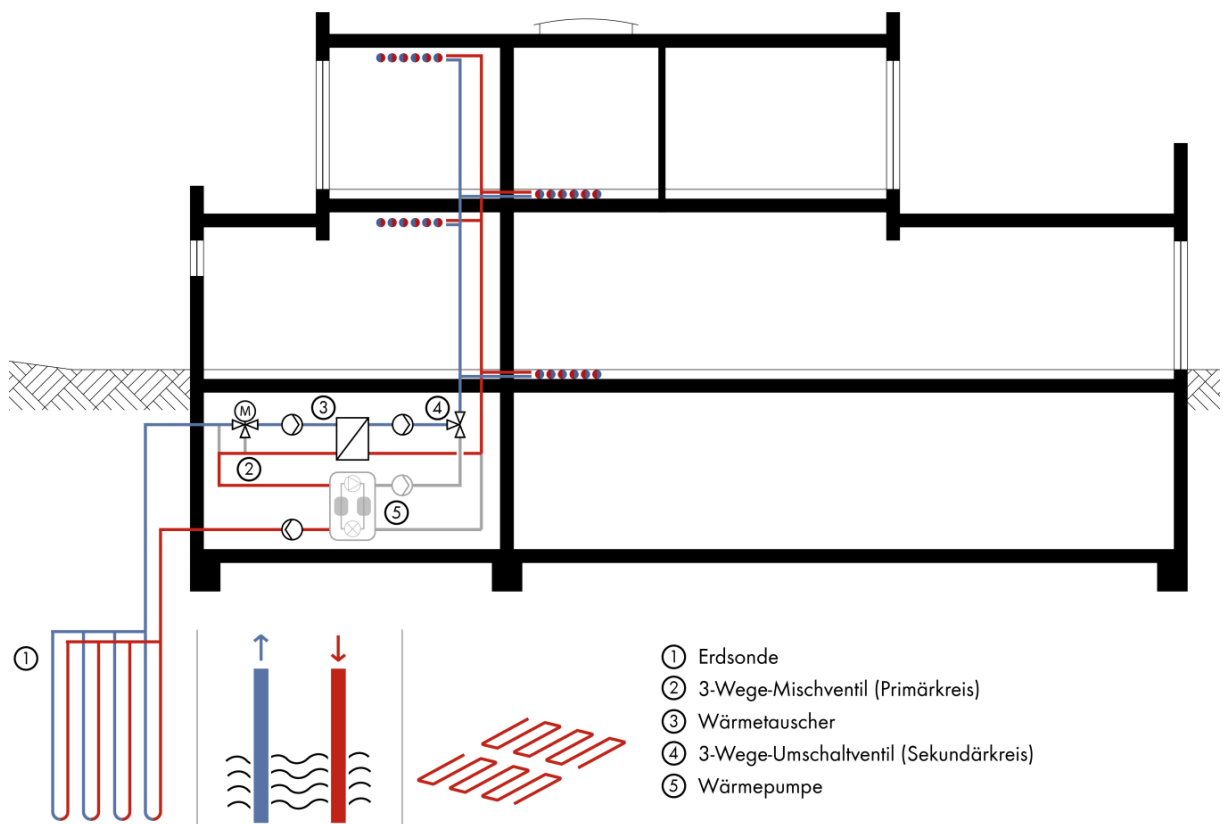


Abbildung 61: Systemskizze zur Verwendung der Wärmepumpe als Kühlung

### Aktive Kühlung

Ist die Temperatur der Kollektoren zu hoch bzw. die Kälteleistung zu niedrig, können reversible Wärmepumpen auch im Kühlbetrieb betrieben werden. Hierbei fungiert die Wärmepumpe als Kältemaschine und gibt die Wärme, die im Haus anfällt, an das Erdreich oder das Grundwasser ab, oder wird zur Warmwasserbereitung bzw. für Schwimmbäder genutzt. Die aktive Kühlung ist auch bei Luft/Wasser-Wärmepumpen möglich. Das Resultat der aktiven Kühlung sind verhältnismäßig hohe Betriebskosten, die je nach System und Quellen-Temperatur unterschiedlich teuer ausfallen. Die Luft/Wasser-Wärmepumpe weist hier im Vergleich zu Sole/Wasser-Systemen deutlich schlechtere Leistungszahlen auf, da die Abwärme an die warme Außenluft abgeben muss. Daher können sich die höheren Investitionskosten der Sole/Wasser-Systeme durch niedrigere Betriebskosten ausgleichen. Je nach Energiequelle unterscheiden sich verfügbare Temperaturniveaus des Temperaturverlaufs im Erdreich und damit die Auslegung und Potentiale für den Kühlfall (vgl. Abbildung 62).

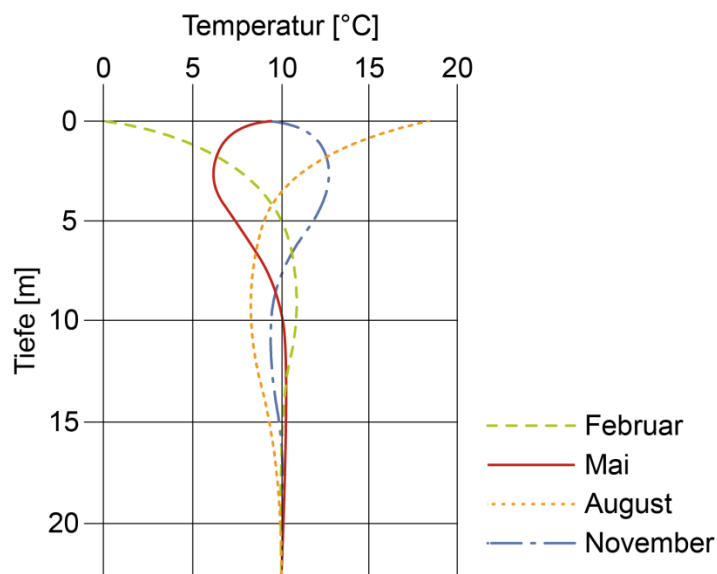


Abbildung 62: Jahreszeitabhängiger Temperaturverlauf im Erdreich

### **Kälteabgabe**

#### Flächensysteme

Flächenheizungen, wie z.B. Fußbodenheizungen werden im Neubau von Wohngebäuden standardmäßig verbaut. Diese Übergabesysteme lassen sich mit relativ geringen Mehrkosten für eine zusätzliche Kühlung im Sommer um- bzw. aufrüsten. Vorteilhaft bei diesen Systemen sind die hohe Behaglichkeit, kein Zugluftrisiko und keine Schallemission der Übergabe. Nachteilig sind die begrenzten Kühlleistungen, da die Vorlauftemperatur nicht unter der Taupunkttemperatur liegen darf. Generell sind daher Vorlauftemperaturen unter 16 - 18 °C nicht möglich. Bedingt durch die große Übertragungsfläche können die Systeme trotzdem mit hohen Vorlauftemperaturen betrieben werden, was die Integration passiver Kühlung bzw. Erneuerbarer Energien unterstützt. Zudem sind die anfallenden Wärmelasten im Wohnungsbau vergleichsweise gering. Allerdings kann die relative Feuchte durch die Kühlung zunehmen, was eventuell Komforteinbußen bringt.

### Konvektoren

Alternativ kann über sogenannte Gebläsekonvektoren gekühlt und entfeuchtet werden. Hierbei können größere Kühlleistungen abgeführt werden. Allerdings werden diese Übergabesysteme eher selten in Einfamilienhäusern eingesetzt und ein zusätzlicher Einbau (neben der Fußbodenheizung) erscheint wirtschaftlich nicht sinnvoll. Konvektoren können unter Umständen auch mit niedrigeren Vorlauftemperaturen ( $< 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) betrieben werden, was die Effizienz der Kälteerzeuger senkt.

### Heizkörper

Ähnlich zu einer Wandkühlung mit wenig Fläche, daher nur sehr geringe Kühlleistung.

Beispielhaft wurde für die Musterliegenschaft von einer Fußbodenkühlung ausgegangen. Konservativ wurde eine Kühlleistung von  $22\text{ W/m}^2$  bei einer aktivierten Fläche von 80 % angesetzt. Ebenso wurde eine Taupunktsteuerung hinterlegt. Durch die Limitierung der Kühlleistung konnten die Übertemperaturgradstunden nicht komplett vermieden, aber um 94 % bis 97 % reduziert werden.

### **7.3.4. Dach**

Die Wahl der Oberflächenfarbe der freiliegenden Abdichtungsbahn ist von entscheidender Bedeutung, um zusätzliche Klima- und Umweltpotentiale generieren zu können. Die Oberflächenfarbe wirkt sich in mehrfacher Hinsicht auf den thermischen und visuellen Komfort aus. Eine dunkle Oberfläche führt zu wesentlich höheren Temperaturen auf der Dachoberfläche, da mehr Solarstrahlung absorbiert wird. Dies hat sowohl Auswirkungen auf die Innenraumtemperaturen der darunterliegenden Räume und damit auf den Komfort im Sommer als auch auf die Lufttemperaturen in unmittelbarer Umgebung und somit auf das Mikroklima. Demgegenüber führt eine helle Oberfläche zu einer stärkeren Reflexion und damit niedrigeren Oberflächentemperaturen. Durch die erhöhte Reflexion auf der Dachoberfläche kann es allerdings bei zurückgesetzten Staffelgeschossen zu Blendung in den Innenräumen kommen. Im Falle der Musterliegenschaft wären die Innenräume des 1. Obergeschosses einer erhöhten Blendefahr ausgesetzt, wenn die Dachoberflächen über dem Erdgeschoss mit hellen Dachbahnen ausgeführt wären.

Zunächst wird aufgezeigt, wie sich die Farbwahl bei der Dachdichtungsbahn auf den Innenraumkomfort im Sommer auswirkt. In einem ersten Schritt wurden die Standardkonstruktionen der Musterliegenschaft mit Wänden aus Kalksandsteinmauerwerk mit Wärmedämmverbundsystem und eine Dachdecke aus Stahlbeton angesetzt. Es wurde von einem Warmdachaufbau mit einer Dämmung aus XPS und einer darauf angeordneten, freiliegenden Dachabdichtungsbahn ausgegangen. Lediglich die Materialeigenschaften der Dachabdichtungsbahn wurden variiert. Einerseits wurde von einer dunklen Bitumendachbahn mit einem Reflexionsgrad von 0,06, andererseits von einer weißen Kunststoffdachbahn ausgegangen. Für die weiße Kunststoffdachbahn wurden für die Materialeigenschaften Herstellerangaben verwendet. Die weiße Dachbahn erreicht fabrikneu einen Reflexionsgrad von 0,8. Im gealterten Zustand reduziert sich dieser auf 0,6. In den folgenden Simulationen wurde immer der für den gealterten Zustand gültige Wert verwendet. Die Auswertung erfolgte für den nach Südost orientierten Raum im 1. Obergeschoss der Musterliegenschaft. Die Ergebnisse können Tabelle 33 entnommen werden.

Bei Verwendung der Expositionsklasse 1 für die Sommerhitze, also dem durchschnittlichen Jahr der Klimaperiode 2021 bis 2050 für den Standort Potsdam, reduzieren sich die Übertemperaturgradstunden im betrachteten Raum allein durch die Farbwahl der Dachabdichtungsbahn um  $24\text{ Kh/a}$  (knapp 14 %). Unter Ansatz der Expositionsklasse 2 (sommerheißes Jahr 2010 für Potsdam) kann der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes mit dieser Konfiguration nicht mehr erbracht werden (Grenzwert nach DIN 4108-2:2013-02:  $1.200\text{ Kh/a}$ ). Die weiße Dachabdichtungsbahn führt allerdings zu einer Reduktion der Übertemperaturgradstunden um  $92\text{ Kh/a}$  (6 %). Die Ergebnisse für die Expositionsklasse 3 liegen deutlich über dem zulässigen Grenzwert und werden deshalb nicht detailliert betrachtet.

Bei der Massivbaukonstruktion kann durch die Farbwahl der freiliegenden Abdichtungsbahn folglich eine Reduktion der Hitzebelastung im Innenraum von circa 10 % erzielt werden.

Tabelle 33: Übertemperaturgradstunden in Kh/a für Massivbau aufgrund der Variation der Oberfläche des Flachdachs

	Expositionsklasse 1	Expositionsklasse 2	Expositionsklasse 3
Freiliegende Bitumen- dachbahn, $\rho = 0,06$	175	1554	3341
Freiliegende, gealterte weiße Kunststoffdach- bahn, $\rho = 0,6$	151	1462	3161
Bekieste Dachbahn, heller Kies, $\rho = 0,5$	62	1376	3119

Die Abdichtungsbahn kann über die Aufbringung einer Kiesschicht der direkten Hitze einwirkung entzogen werden. In Abhängigkeit der Farbigekeit und der Korngröße des verwendeten Kies ergeben sich auch bei diesem Material sehr unterschiedliche Reflexionsgrade. Pisello et al. (2014) ermittelten für verschiedene Kiessorten in Abhängigkeit der Farbigekeit und der Korngröße den Reflexionsgrad. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede. Die im Labor gemessenen Reflexionsgrade variieren zwischen 0,27 und 0,62. Je heller die Farbe und je kleiner die Korngröße, desto höher der Reflexionsgrad. Im Rahmen der vorliegenden Simulationen wurde ein Reflexionsgrad für den Kies von 0,5 angesetzt. Dies entspricht einem hellen Kies üblicher Korngröße. Infolge des relativ hohen Reflexionsgrades und der zusätzlichen thermischen Speichermasse der 10 cm dicken Kiesauflage kann die thermische Behaglichkeit im Sommer weiter verbessert werden (Tabelle 33, Zeile 4). Durch die Sonneneinstrahlung muss zunächst die gesamte Masse der Kiesauflage erwärmt werden, bevor sich ein wesentlicher Wärmestrom durch das Dach in den Innenraum einstellt. Gegenüber der hellen Dachabdichtungsbahn können für die Expositionsklasse 1 und 2 die Übertemperaturgradstunden um circa 90 Kh/a weiter reduziert werden.

Bei Gebäudekonstruktionen mit geringer thermischer Speichermasse der Bauteile, also insbesondere im Holzbau kann sich die Wahl der Oberflächenfarbe einer freiliegenden Dachabdichtung noch wesentlich stärker auf den Innenraumkomfort bzw. den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes auswirken. Hier zeigt sich in der Expositionsklasse 1, dass allein durch die Veränderung der Materialeigenschaften der Abdichtungsbahn die Übertemperaturgradstunden um mehr als 300 Kh/a (über 20 %) reduziert werden können und dadurch der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes erbracht werden kann. Bei der geringeren thermischen Speichermasse des Flachdachaufbaus aus Holz macht sich eine Bekiesung mit hellem Kies der Oberfläche noch wesentlich stärker bemerkbar (Tabelle 34, Zeile 4). Es ergibt sich eine Reduktion der Übertemperaturgradstunden gegenüber einer Holzkonstruktion mit einer weißen Dachbahn um nochmals 55 %.

Flachdächer mit freiliegender Dachdichtungsbahn sollten nur zu Wartungszwecken begangen werden. Ist planmäßig eine Nutzung als Dachterrasse vorgesehen, muss ein anderer Aufbau gewählt werden. Infolge der fehlenden Auflast müssen die Dämm- und die Abdichtungsebene entweder mit der Tragstruktur verklebt oder mechanisch an dieser befestigt werden. Die Verklebung ist aus Sicht des Recyclings als negativ zu beurteilen. Aus diesem Grund sind mechanische Befestigungen zu bevorzugen. Dabei werden die Abdichtungsbahnen an Ihren Rändern über Befestigungsmittel zusammen mit der Dämmung an der Tragstruktur befestigt. Die benachbarte Abdichtungsbahn wird so verlegt, dass sie die mechanischen Befestigungsmittel und damit die Durchdringungen überlappt. Die Fugen zwischen den beiden Bahnen werden verschweißt.

Tabelle 34: Übertemperaturgradstunden in Kh/a für Holzbau aufgrund der Variation der Oberfläche des Flachdachs

	Expositionsklasse 1	Expositionsklasse 2	Expositionsklasse 3
Freiliegende Bitumen- dachbahn, $\rho = 0,06$	1413	3017	5725
Freiliegende, gealterte weiße Kunststoffdach- bahn, $\rho = 0,6$	1101	2517	4838
Bekieste Dachbahn, heller Kies, $\rho = 0,5$	486	2175	4301

Der Cool Roof Rating Council veröffentlicht eine frei zugängliche Datenbank in der Reflexions- und Emissionsgrade von Dachmaterialien gelistet sind (CRRC 2019). Darin werden die Reflexionsgrade der Materialien im Neuzustand und nach dreijähriger Bewitterung angegeben. Im Folgenden wurde untersucht, wie sich die Verwendung weißer Kunststoffdichtungsbahnen im Vergleich zu standardmäßigen Bitumendachbahnen auf das Mikroklima am Mustergebäude auswirkt. Die Simulationen zum Mikroklima wurden mit der Software ENVI\_MET durchgeführt. Der Vergleich basiert auf folgenden Randbedingungen: Sämtliche Dachflächen wurden entweder mit der gealterten weißen Kunststoffdichtungsbahn oder eine standardmäßigen Bitumendachbahn belegt, während alle anderen Materialkennwerte, die Umgebung und der Klimadatensatz unverändert blieben. Die Materialkennwerte der Dachbahnen sind in Tabelle 35 dargestellt.

Tabelle 35: Materialkennwerte Bitumendachbahn und weiße Kunststoffdichtungsbahn

Kennwert	Bitumendachbahn	Kunststoffdichtungsbahn
Absorption	0,94	0,40
Reflexion	0,06	0,60
Emissionsgrad	0,96	0,94
Rohdichte in $\text{kg}/\text{m}^3$	1.200	2.200
Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{mK})$	0,170	0,170
Spezifische Wärmekapazität in $\text{J}/(\text{kg K})$	1.500	1.500

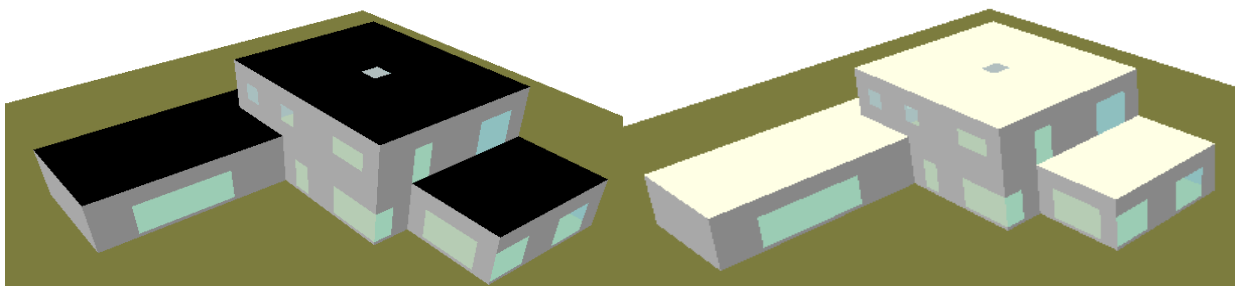


Abbildung 63: Simulationsmodelle der Musterliegenschaft mit Bitumendachbahn und weißer Kunststoffdichtungsbahn

Die beiden in ENVI\_MET aufgesetzten Simulationsmodelle sind in Abbildung 63 gegenübergestellt. Simuliert wurde ein strahlungsreicher Tag mit hohem Sonnenstand für den Klimadatensatz der Expositionsklasse 1, also dem durchschnittlichen Testreferenzjahr 2035 für den Standort Potsdam. Die Simulationsperiode umfasst den 25. Juni von 0.00 Uhr bis 24.00 Uhr. Die Klimadaten für den untersuchten Tag sind in Abbildung 64 dargestellt.

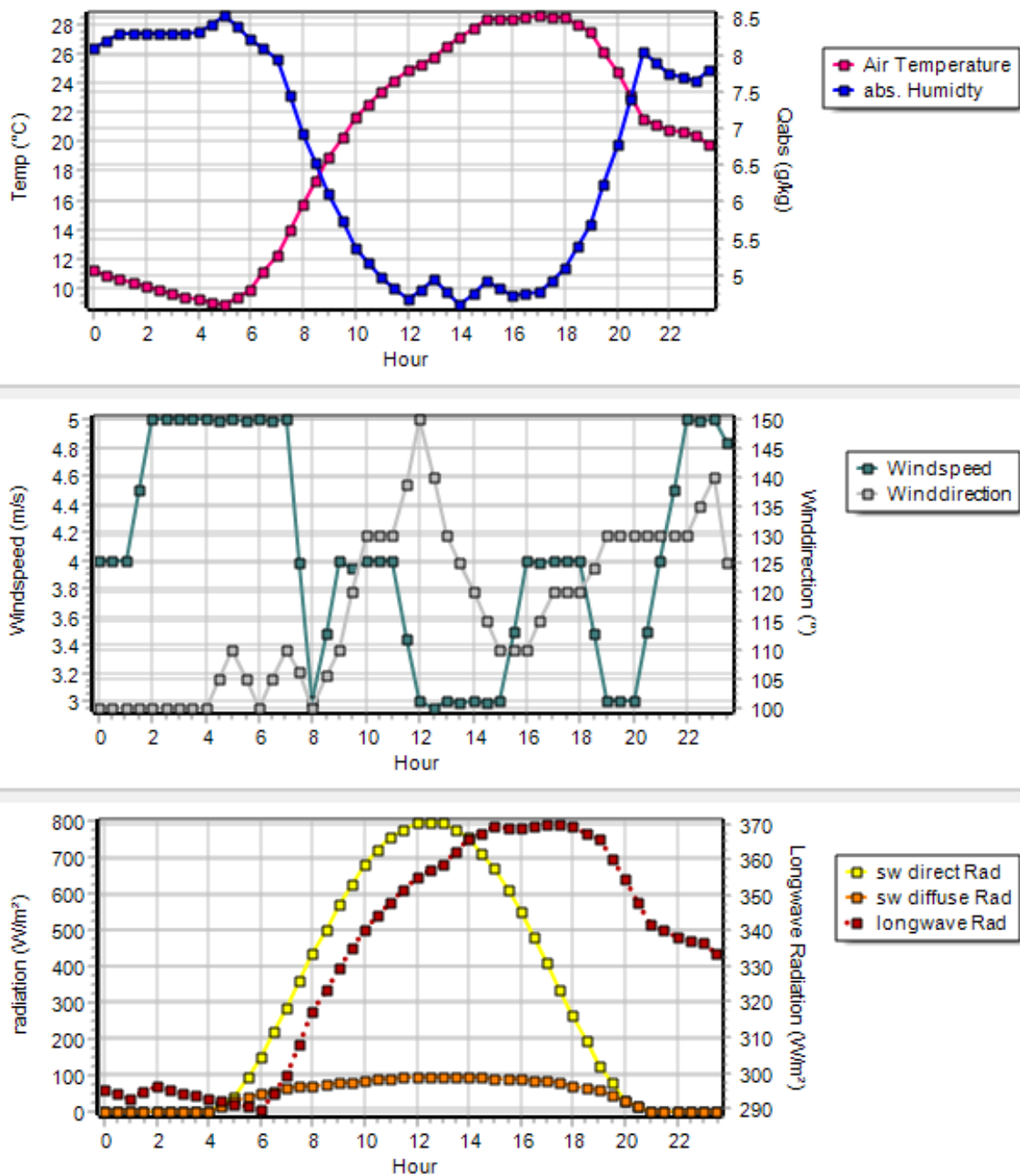


Abbildung 64: Klimadaten für den Untersuchungstag 25. Juni

Zunächst wurden die Oberflächentemperaturen der Bauteile verglichen. Abbildung 65 zeigt die Oberflächentemperaturen bei Verwendung einer schwarzen Bitumendachbahn. Um 15.00 Uhr wird an der kritischsten Stelle eine maximale Oberflächentemperatur auf der Dachfläche von 64,28 °C erreicht. Abbildung 66 zeigt das Ergebnis bei Verwendung der gealterten weißen Kunststoffdichtungsbahn. Bei dieser Ausführung liegt die maximale Oberflächentemperatur unter 40 °C. Abbildung 67 zeigt die absoluten Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Ausführungen. In großen Bereichen der Dachfläche weisen die beiden Ausführungsvarianten Temperaturdifferenzen von über 22 K auf. Maximal ergeben sich Oberflächentemperaturdifferenzen von nahezu 30 K.

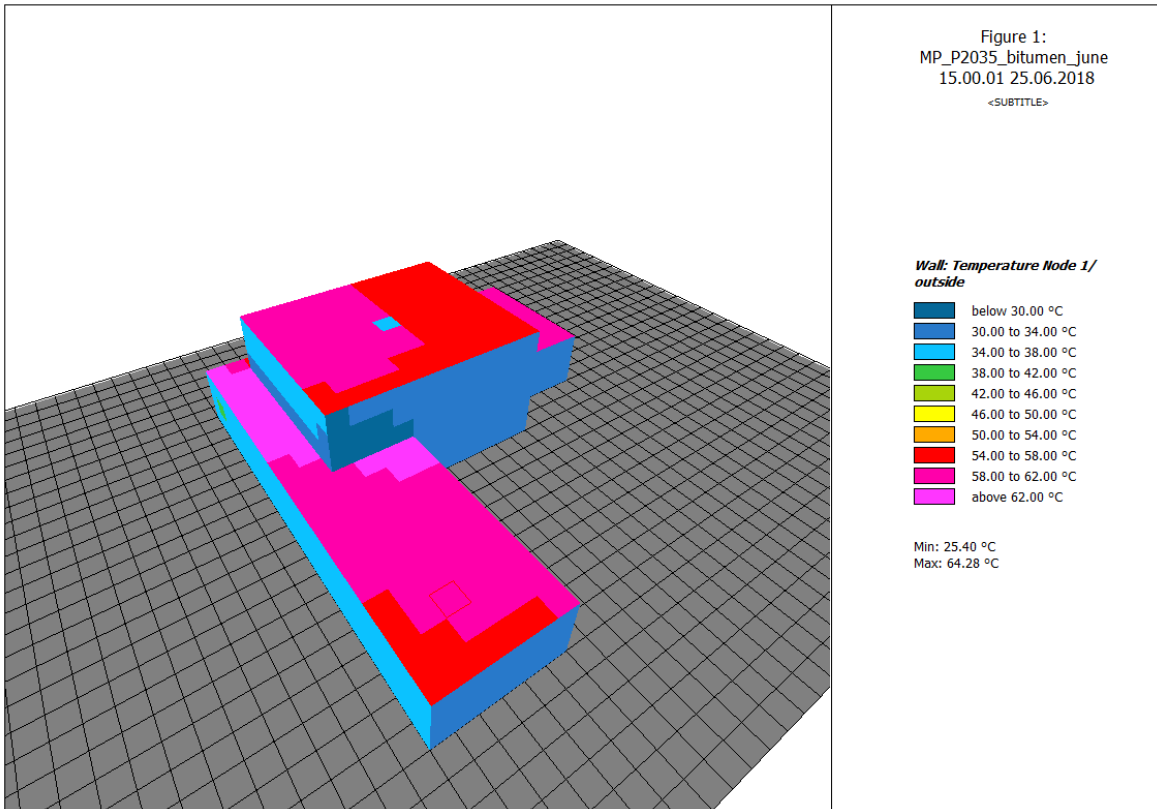


Abbildung 65: Oberflächentemperaturen in °C der Bauteile bei Verwendung einer Bitumendachbahn

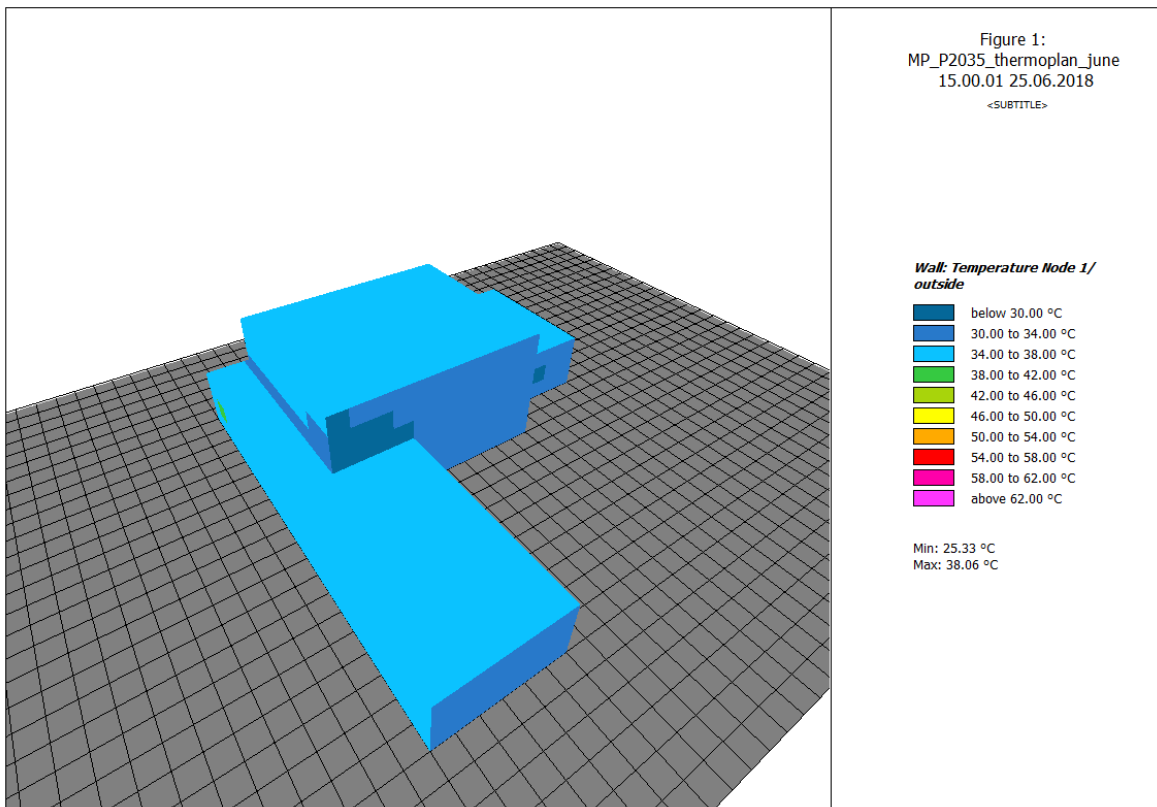


Abbildung 66: Oberflächentemperaturen in °C der Bauteile bei Verwendung einer weißen Kunststoffdichtungsbahn



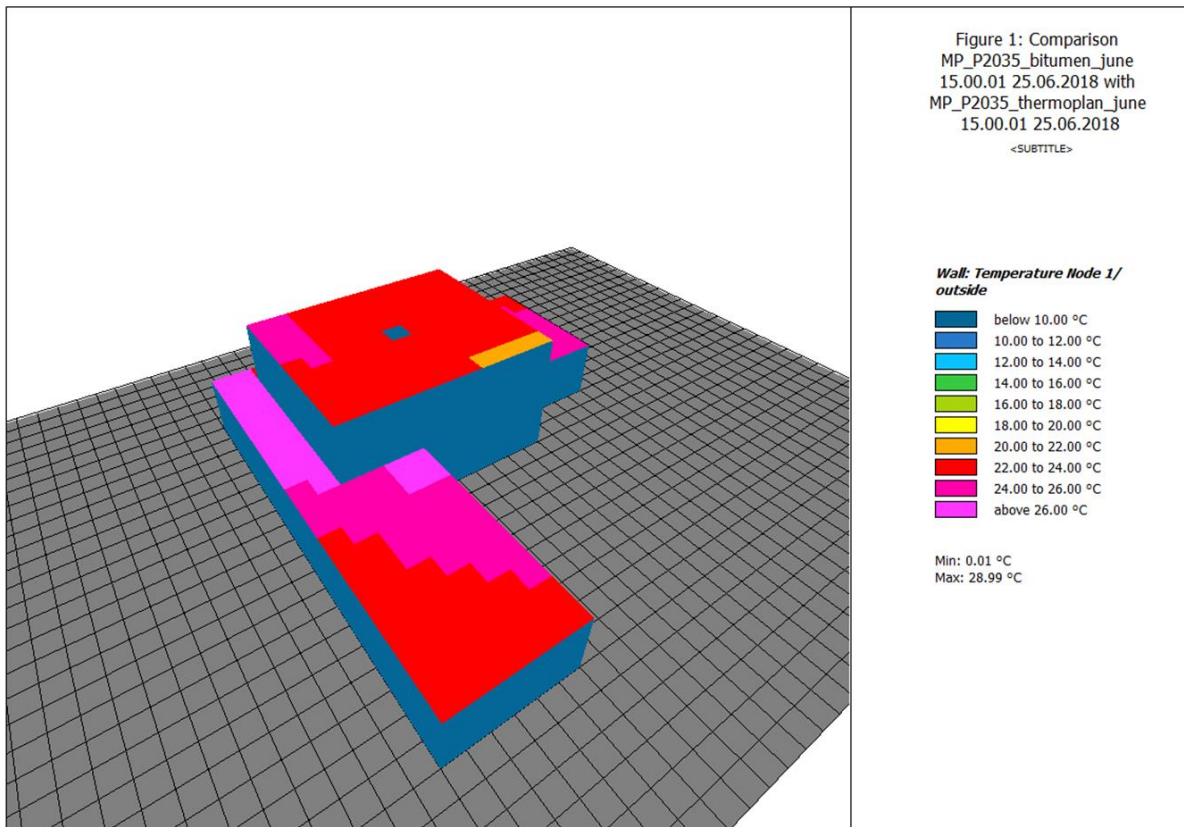


Abbildung 67: Oberflächentemperaturdifferenz in °C zwischen Bitumendachbahn und weißer Kunststoffdichtungsbahn

Im weiteren Verlauf wurden die Lufttemperaturdifferenzen in der Umgebung des Mustergebäudes betrachtet (Abbildung 68 und Abbildung 69). Dabei ergeben sich auf der sonnenzugewandten Seite maximale Temperaturdifferenzen von 0,48 K.

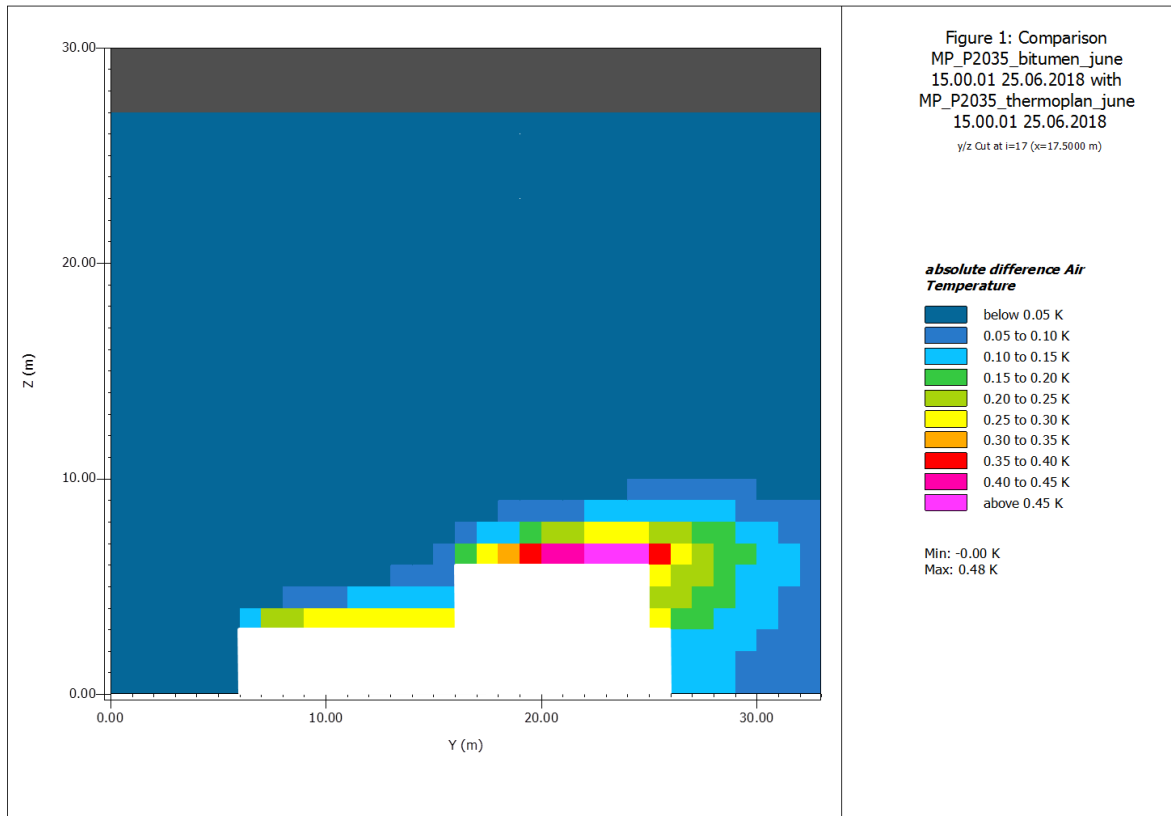


Abbildung 68: Lufttemperaturdifferenz in K zwischen Bitumen- und weißer Kunststoffbahn (Gebäudeschnitt)

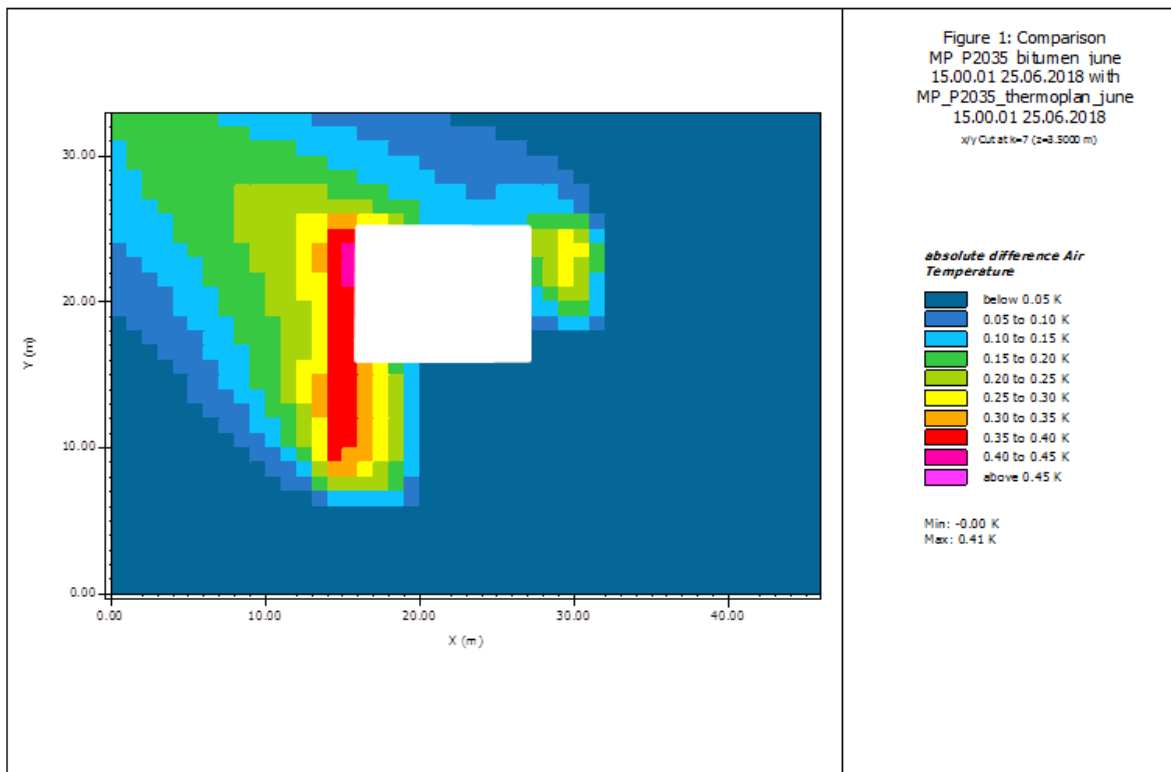


Abbildung 69: Lufttemperaturdifferenz in K zwischen Bitumen- und weißer Kunststoffbahn 3,5 m über GOK

Abbildung 70 zeigt die Lufttemperaturdifferenzen vor der Fassade. Bei Verwendung einer weißen Kunststoffdichtungsbahn anstelle einer schwarzen Bitumendachbahn kann die Lufttemperatur vor der Fassade für den betrachteten Simulationszeitraum um bis zu 0,48 K reduziert werden.

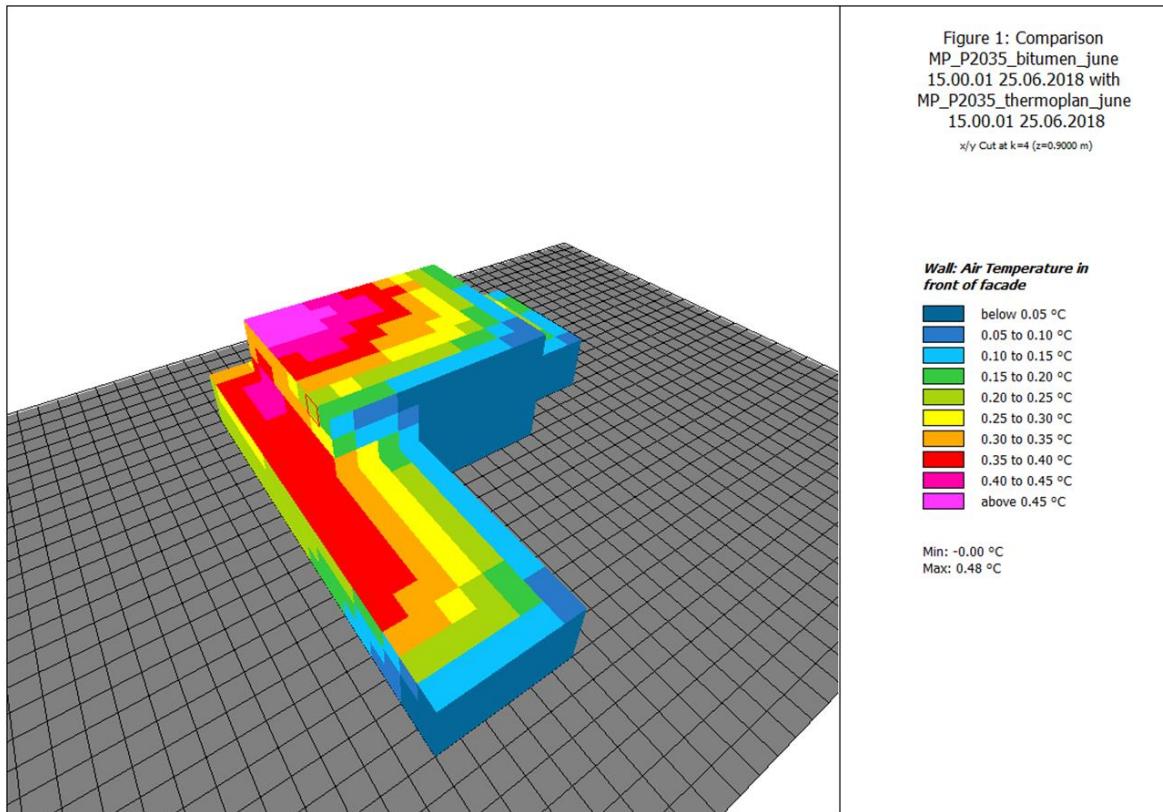


Abbildung 70: Lufttemperaturdifferenz in K vor der Fassade

Die Verwendung einer weißen Kunststoffdichtungsbahn der Hagelwiderstandsklasse HW 5 zur Reduktion der Sensitivität gegenüber der Einwirkung Hagel führt gleichzeitig zu einer verminderten Exposition gegenüber der Einwirkung Sommerhitze. Auf die Resilienz gegenüber der Einwirkung Hagel wird in Kapitel 7.6.3 näher eingegangen.

## 7.4. Starkregen

### 7.4.1. Standortwahl

Die Expositionsclassen für die Einwirkungen Starkregen und Hochwasser wurden in Kapitel 6.2 und Kapitel 6.3 allgemeingültig definiert. Um beispielhafte Anpassungsmaßnahmen entwickeln und aufzeigen zu können sind absolute Niederschlagshöhen und Hochwasserstände erforderlich. Für den Standort gelten im Hinblick auf die beiden Einwirkungen folgende Randbedingungen:

- Starkregen: Für die Einwirkung Starkregen wird ein Standort gewählt, der in Bezug auf die in Deutschland auftretende Bandbreite eine mittlere Starkniederschlagshöhe aufweist.
- Hochwasser: Für die Einwirkung Hochwasser soll sich der Standort in einem Gebiet befinden, das von einem HQ<sub>100</sub> eines Fließgewässers betroffen ist.

Eine Untersuchung anhand eines Standorts mit einer sehr hohen maximalen Starkniederschlagshöhe scheint nicht geeignet, da ansonsten bei der weiteren Bearbeitung konstruktive Lösungsansätze entwickelt würden, die für große Teile Deutschlands überdimensioniert wären, was dem Prinzip der Ressourceneffizienz widerspricht. Für extreme Regenereignisse mit einem Starkregenindex  $> 7$  müssen aufgrund der Schwere des Ereignisses gesonderte Maßnahmen erfolgen, deren Untersuchung aber nicht Teil dieser Arbeit ist. Es stellt sich ebenso die Frage, ob ein Gebäude auf jeden möglichen Lastfall ausgelegt werden kann und muss. Ab einer bestimmten Stärke der Einwirkung können Anpassungsmaßnahmen auf ökologischer und ökonomischer Ebene unwirtschaftlich werden. Neben einer Zunahme an Grauer Energie nimmt auch der Ressourcenverbrauch zu. Somit kann der Aufwand zur Herstellung eines Schutzes größer sein als der zu erwartende Schaden aufgrund der Einwirkung. Ebenso steht der Aufwand der Planung und Fertigung nicht im Verhältnis zum seltenen Eintritt eines solchen Schadenereignisses.

Die Planung von Gebäuden innerhalb eines hochwassergefährdeten Gebiets ist in Deutschland entsprechend des Wasserhaushaltsgesetzes prinzipiell nicht gestattet. Wird für die Einwirkung Hochwasser ein Standort gewählt, der von einem HQ<sub>100</sub> noch nicht betroffen ist, sich aber an der Grenze zu einer Fläche befindet, die von einem HQ<sub>100</sub> betroffen ist, ist für die Liegenschaft infolge des Klimawandels bereits für die Expositionsklasse 1 von einer Gefährdung auszugehen. Die resultierende Wasserstandshöhe kann nach der Definition der Expositionsclassen jedoch nicht ermittelt werden, da für den jeweiligen Standort für die Wasserstandshöhe bei einem HQ<sub>100</sub> ohne Berücksichtigung der Klimaänderung keine Daten vorliegen. Um die Wasserstandshöhe am Rande eines HQ<sub>100</sub>-Gebiets zu ermitteln, sind topographische Schnitte nötig, aus denen der Verlauf des Hochwasserstands ermittelt werden kann. Zusätzlich kann der Anstieg des Wasserstandes dazu führen, dass sich für Liegenschaften, die von einem HQ<sub>100</sub> eigentlich nicht betroffen sind, durch den Klimawandel eine neue Gefährdungssituation ergibt (Abbildung 71). Aus Gründen der besseren Zugänglichkeit der Daten wird daher davon ausgegangen, dass die Ausnahmeregelungen nach § 78, Abs. 2 des Wasserhaushaltsgesetz erfüllt sind und die Errichtung des Gebäudes in einem hochwassergefährdeten Gebiet genehmigungsfähig wird.

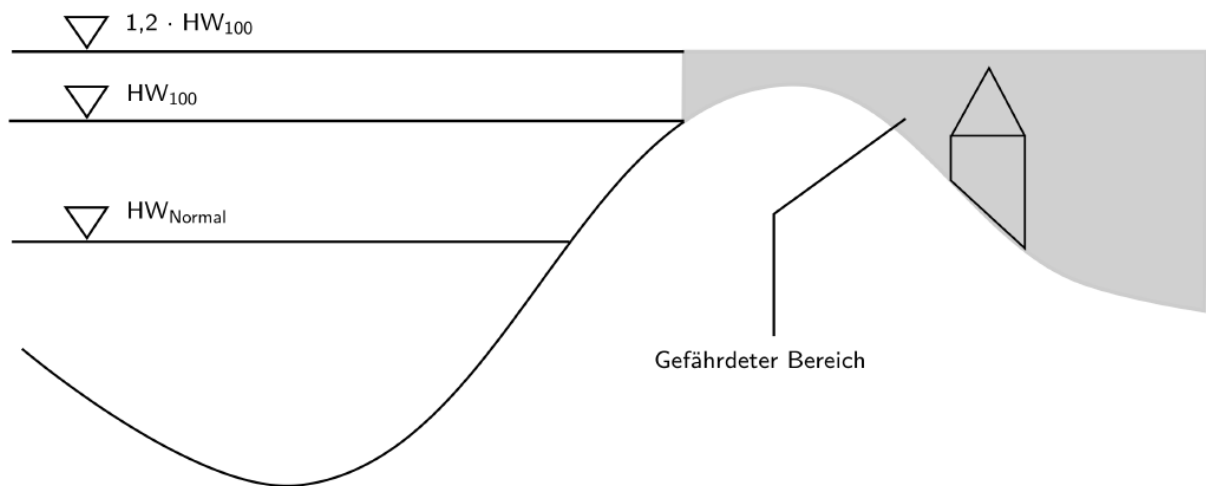


Abbildung 71: Änderung des hochwassergefährdeten Bereichs durch den klimawandelbedingten Anstieg des Hochwasserstands

Um einen geeigneten Standort für die Einwirkung Starkregen zu finden, werden die Rasterdaten von KOSTRA-DWD-2010 (DWD 2016d) ausgewertet. In einem ersten Schritt wird für die bemessungsrelevanten Dauerstufen zwischen  $D = 5$  Minuten und  $D = 60$  Minuten mit den in Kapitel 6.2 festgelegten Jährlichkeiten  $T = 5$  Jahre,  $T = 30$  Jahre und  $T = 100$  Jahre der jeweilige Mittelwert der Niederschlagshöhen der Rasterdaten bestimmt. Um die Auswahl an möglichen Standorten zu erweitern, wird eine Abweichung von  $0,3$  mm vom jeweiligen Niederschlagshöhenmittelwert zugelassen. Anhand dieser Herangehensweise können 26 Rasterfelder ermittelt werden, die in allen untersuchten Dauerstufen im Zielbereich um den Mittelwert liegen. Die Rasterfelder befinden sich in mehreren Bundesländern, wobei sich Akkumulationen von Rasterfeldern in einem Streifen südlich der Schwäbischen Alb bis Niederbayern, in Südwestdeutschland und nördlich des Harz feststellen lassen (Abbildung 72).

Im Hinblick auf die Einwirkung Hochwasser wird ein Standort in Baden-Württemberg ausgewählt. In den Hochwassergefährdungskarten des Landes werden im Gegensatz zu nahezu allen anderen Bundesländern neben der Ausweisung von überflutungsgefährdeten Flächen für jede Liegenschaft die jeweiligen Überflutungstiefen für ein  $HQ_{10}$ , ein  $HQ_{50}$ , ein  $HQ_{100}$  und ein  $HQ_{Extrem}$  dargestellt. Weiterhin kann über eine interaktive Onlinekarte sehr einfach auf die Daten zurückgegriffen werden (LUBW 2019). Der gewählte Standort befindet sich im Rasterfeld mit dem Index 93036 und den Koordinaten des Mittelpunkts des Feldes von  $48^{\circ}06'51.7''N$   $10^{\circ}06'47.6''O$  (DWD 2016d) und liegt am Unterlauf der Iller nördlich von Memmingen auf ungefähr der halben Entfernung zwischen der Anschlaglinie eines  $HQ_{50}$  und eines  $HQ_{100}$ . Somit führt erst ein hundertjähriges Hochwasser zur Überflutung der Liegenschaft. In der Abbildung 72 ist der Rastermittelpunkt des gewählten Rasterfeldes als Quadrat markiert.

Die Grundlage für die Zuordnung der Niederschlagshöhen zu den Expositionsklassen bilden die über KOSTRA-DWD 2010 (DWD 2016d) ermittelten Niederschlagshöhen für den Standort (Tabelle 36). Um die Einwirkungen des Klimawandels zu berücksichtigen, werden die Werte in Tabelle 36 mit dem Klimaänderungsfaktor von 1,2 beaufschlagt. In Tabelle 37 sind die so ermittelten Niederschlagshöhen unter Berücksichtigung des Klimaänderungsfaktors für den Standort mit der entsprechenden Zuordnung zu den Expositionsklassen dargestellt.

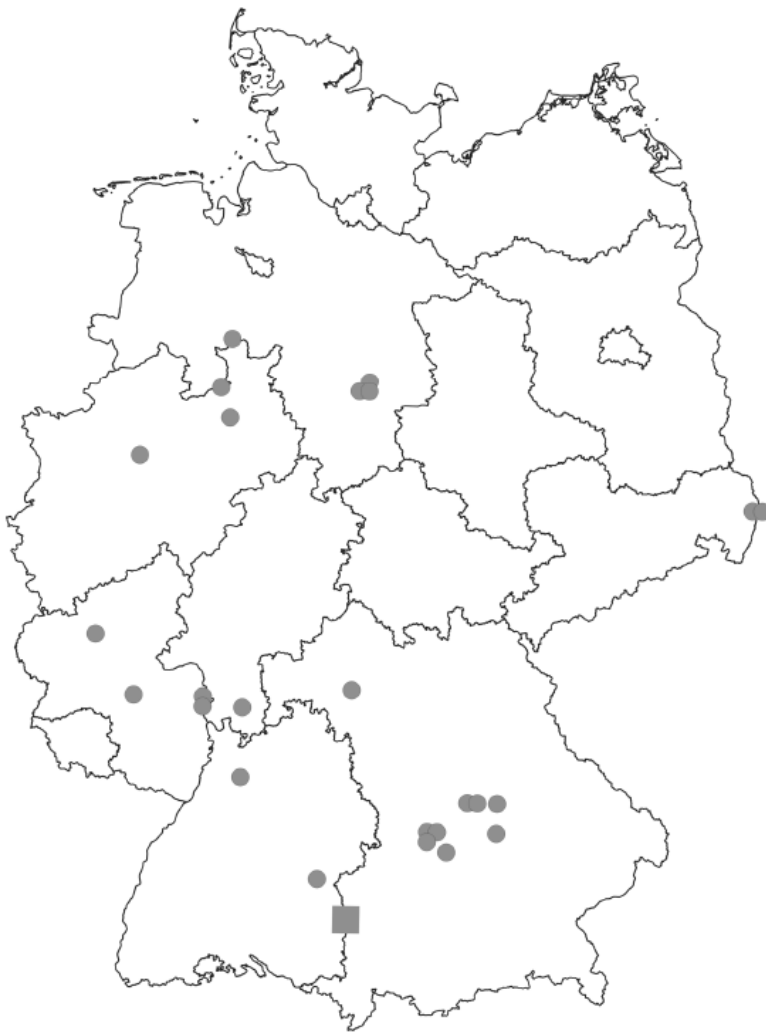


Abbildung 72: Übersicht über die geeigneten Rasterfelder (Quadrat: Mittelpunkt des gewählten Rasterfelds)

Tabelle 36: Niederschlagshöhe  $h_{D,T}$  in mm ohne Berücksichtigung des Klimaänderungsfaktors

Expositionsklasse	Dauerstufe D in min	5	10	15	20	30	45	60
	1 (Jährlichkeit T = 5a)		9,0	13,5	16,6	18,9	22,2	25,6
2 (Jährlichkeit T = 30a)		13,2	19,3	23,5	26,8	31,8	37,1	41,1
3 (Jährlichkeit T = 100a)		16,1	23,2	28,2	32,1	38,2	44,8	49,9

Tabelle 37: Niederschlagshöhe  $h_{D,T}$  in mm mit Berücksichtigung des Klimaänderungsfaktors

	Dauerstufe D in min	5	10	15	20	30	45	60
<b>Expositionsklasse</b>								
1 (Jährlichkeit T = 5a)		10,8	16,2	20,0	22,7	26,6	30,7	33,6
2 (Jährlichkeit T = 30a)		15,8	23,2	28,2	32,2	38,1	44,5	49,3
3 (Jährlichkeit T = 100a)		19,3	27,8	33,8	38,5	45,8	53,8	59,9

Für die spätere Bemessung der Entwässerungsanlagen werden Bemessungsregenspenden benötigt. Die Bemessungsregenspenden  $r_{D,T}$  können wie folgt ermittelt werden:

$$r_{D,T} = \frac{h_{D,T}}{D} \quad (\text{Gl. 5})$$

mit

$r_{D,T}$  Bemessungsregenspende in  $l/(s \cdot m^2)$   
 $h_{D,T}$  Niederschlagshöhe in mm =  $l/m^2$   
 $D$  Dauerstufe in s

Tabelle 38: Bemessungsregenspende  $r_{D,T}$  in  $l/(s \cdot m^2)$  mit Berücksichtigung des Klimaänderungsfaktors

	Dauerstufe D in min	5	10	15	20	30	45	60
<b>Expositionsklasse</b>								
1 (Jährlichkeit T = 5a)		0,036	0,061	0,067	0,076	0,089	0,102	0,112
2 (Jährlichkeit T = 30a)		0,053	0,077	0,094	0,107	0,127	0,148	0,164
3 (Jährlichkeit T = 100a)		0,064	0,093	0,113	0,128	0,153	0,179	0,200

#### 7.4.2. Starkregengefahrenkarten

Zur Ermittlung der Gefährdung von einzelnen Liegenschaften werden Starkregengefahrenkarten entwickelt. Die Starkregengefahrenkarten geben über eine hydraulische Modellierung unter Berücksichtigung der Topographie, der Umgebungsbebauung sowie der Abflussleistung von Entwässerungssystemen Auskunft über die Gefährdung von Liegenschaften. Im Unterschied zu den Hochwassergefährdungskarten ist die Erstellung von Starkregengefährdungskarten jedoch mit deutlich größeren Unsicherheiten verbunden. Ebenso ist die Erstellung von Starkregengefährdungskarten eine kommunale Aufgabe. Somit existiert bundesweit keine einheitliche Darstellung der Gefährdung durch Starkregen. Wird bei der Planung eines Gebäudes von Gefährdung durch Starkregen ausgegangen, muss bei der jeweiligen Kommune nach den erstellten Starkregengefahrenkarten Auskunft eingeholt werden. In der Abbildung 73 ist der Ausschnitt einer erstellten Starkregengefahrenkarte für ein extremes Regenereignis dargestellt. Deutlich zeigt sich der Einfluss der Topographie und die damit verbundene Gefährdung der Bereiche am rechten Bildrand sowie im Ortskern.



Abbildung 73: Ausschnitt einer Starkregengefahrenkarte für Mönshausen im Enzkreis (Stadtverwaltung Mönshausen 3. 07. 2019)

### 7.4.3. Fassade

Die Fassade ist von der Einwirkung Starkregen hauptsächlich durch Schlagregen gefährdet, also dem gleichzeitigen Auftreten von Starkregen und Wind. Nach DIN 4108-3:2018-10 kann Regenwasser aufgrund der kapillaren Saugwirkung der Fassadenmaterialien sowie Konstruktionsfehler durch mangelnde Abdichtung oder Risse in das Innere des Bauteilaufbaus gelangen und dort Schäden verursachen. Eine weitere Gefährdung für die Fassade aufgrund von Starkregen ist der oberflächige Abfluss von Wasser resultierend aus einer Hang- oder Muldenlage. Zudem kann das Versagen der Entwässerungseinrichtungen von Dach- oder Freiflächen zu schwerwiegenden Feuchteschäden an der Fassade führen (Egli/Stucki 2007).



Grundlage der Dimensionierung von Fassaden gegen Schlagregen ist die DIN 4108-3:2018-10. Für die Dichtigkeit von Fenstern und Türen gegen Schlagregen gilt die DIN EN 12208:1999 und für Vorhangfassaden die DIN EN 12154:1999. Der gewählte Standort wird der Beanspruchungsgruppe III (starke Schlagregenbeanspruchung) zugeordnet. Die überschlägige Einteilung in die drei Beanspruchungsgruppen I, II und III erfolgt über die Übersichtskarte der DIN 4108-3:2018-10. Nach Norm sind die folgenden Wandbauarten für die Beanspruchungsgruppe III geeignet:

- Wasserabweisender Außenputz auf Außenwänden aus Mauerwerk, Wandbauplatten, Beton, u.ä.,
- Zweischaliges Verblendmauerwerk mit Luftschicht und Wärmedämmung oder mit Kerndämmung (mit Innenputz),
- Außenwände mit im Dickbett oder Dünnbett angemörtelten Fliesen oder Platten nach DIN 18515-1:2017-08 mit wasserabweisendem Ansetzmörtel,
- Außenwände mit gefügedichter Betonaußenschicht,
- Wände mit hinterlüfteten Außenwandbekleidungen,
- Wände mit Außendämmung z.B. Wärmedämmputz-, Wärmedämm-Verbundsystem,
- Außenwände in Holzbauart mit Wetterschutz nach DIN 68800-2:2012-02.

Die Bemessung auf Schlagregendichtheit von Fenstern und Türen ist unabhängig von der Ausführungsvariante der Wand. Die Bemessung erfolgt nach einem Prüfverfahren, das in der DIN EN 1027:2016-09 festgeschrieben ist. Die Klassifizierung der Bauteile erfolgt nach DIN EN 12208:1999 in einer 11-stufigen Skala. Bei der Prüfung wird das gesamte Bauteil mit den jeweiligen Einzelkomponenten betrachtet. Die niedrigste festgestellte Stufe jeder Einzelkomponente wird als maßgebend für das ganze Bauteil erachtet. Die Einteilung in Klassen erfolgt in Abhängigkeit des maximalen Winddrucks. Dieser kann über die Windzonenkarte der DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 ermittelt werden. Der gewählte Untersuchungsstandort befindet sich im Binnenland in der Windzone 2, was einem Windgeschwindigkeitsdruck nach dem vereinfachten Verfahren von  $0,65 \text{ kN/m}^2$  entspricht. Der Anteil der Windlast zur Schlagregenbelastung beträgt 25 % und damit  $0,16 \text{ kN/m}^2$  (= 160 Pa) (PFB GmbH & Co. 2016). Fenster in ungeschützten Einbausituationen müssen für diesen Anforderungsfall die Mindestanforderung der sechsten Stufe (Klasse 5A) nach DIN EN 12208:1999 erfüllen.

Vorgehängte hinterlüftete Fassaden sind für die höchste in Deutschland definierte Schlagregenbeanspruchungsgruppe geeignet. Sie besteht aus der tragenden Außenwand einer Unterkonstruktion, Wärmedämmung, einem Hinterlüftungsspalt sowie einer meist plattenförmigen Bekleidung. Die Unterkonstruktion wird entweder aus Metall oder aus Holz hergestellt. Aber auch Kombinationen aus beiden Materialien sind möglich und üblich. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Wärmedämmung durch Dämmstoffhalter an der tragenden Außenwand befestigt wird und nicht durch Klebverfahren. Dies sichert die sortenreine Trennung und verhindert Kleberückstände an den Oberflächen. Der Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden empfiehlt als Dämmung Mineralwollgedämmstoffe des Typs WAB T3 WL(P) nach DIN EN 13162:2015-04 (FVHF 2017: 22). Als Bekleidungs-elemente kommen die unterschiedlichsten Materialien zum Einsatz, sodass eine große Bandbreite hinsichtlich der Gestaltung abgebildet wird:

- Holz,
- Holzwerkstoffe,
- Faserzement,
- Faserbeton,
- Metall,
- Keramik,
- Glas,
- Betonwerkstein,
- Naturwerkstein,
- Putzträgerplatte,
- Textil,
- Photovoltaik/Solarthermie.

Dabei beeinträchtigen offene Fugen zwischen den Bekleidungsplatten der VHF den Regenschutz nicht. Beträgt der Anteil der Öffnungen an der Fassadenbekleidung mehr als 5 % oder beträgt die Fugenbreite mehr als 15 mm, ist durch zusätzliche konstruktive Maßnahmen der Witterungsschutz sicherzustellen (FVHF 2017). Die Klassifizierung der Dichtigkeit der VHF ergibt sich aus der DIN EN 12154:1999. Analog zur Dichtigkeit von Fenstern und Türen werden die Vorhangfassadenprodukte einem Prüfverfahren unterzogen und im Anschluss daran in fünf Stufen klassifiziert. Bei der VHF wird identisch wie bei Fenstern und Türen anhand der Windzonenkarte aus der DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 der Winddruck für den Standort zu 160 Pa ermittelt. Anhand des Winddrucks muss die VHF mindestens die Klasse R5 erreichen, was der zweitniedrigsten Stufe entspricht. Die Dichtigkeitsklasse ist unabhängig von den für die Einwirkung Starkregen definierten Expositionsklassen. Der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade ist in der Abbildung 74 dargestellt.

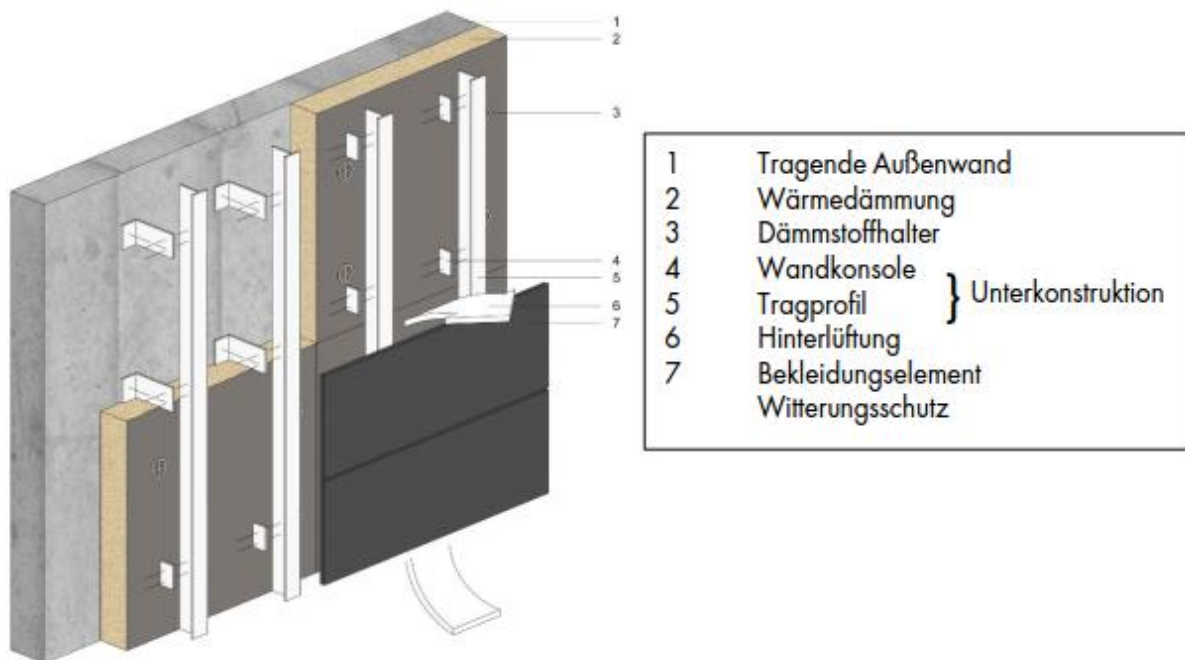


Abbildung 74: Prinzipieller Aufbau einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade

#### 7.4.4. Dach

Die in Kapitel 3 beschriebene Musterliegenschaft weist eine Flachdachkonstruktion auf. Im Vergleich zu Steildächern bieten Flachdachoberflächen je nach Ausführung erweiterte Nutzungsmöglichkeiten beispielsweise als Verkehrsflächen, Dachterrassen oder Grünflächen. Die Möglichkeiten, um zusätzliche Klima- und Umweltpotentiale zu erschließen, sind somit bei Flachdächern besonders groß.

Für die Ausführung der Flachdachkonstruktion sind im Hinblick auf Starkregenereignisse die Funktion der Gebäudeabdichtung sowie die Wasserabführung zu bewerten. Bei der Wasserabführung sind die zwei Faktoren direkte Abführung und Rückhaltung, die sich gegenseitig bedingen, für die Bemessung von Bedeutung. Daher wird für jede der untersuchten Varianten die bei einem Starkregenereignis anfallende Regenwassermenge, die über die Dachfläche abgeführt wird, berechnet. Die abfließende Regenwassermenge wird als Regenwasserabfluss bezeichnet. Der Regenwasserabfluss für die Bemessung der Entwässerungsanlagen wird nach folgender Gleichung der DIN 1986-100:2016-12 ermittelt:

$$Q_r = r_{D,T} \cdot C \cdot A \quad (\text{Gl. 6})$$

mit

$Q_r$	Regenwasserabfluss in l/s
$r_{D,T}$	Bemessungsregenspende in l/(s m <sup>2</sup> ), siehe Tabelle 38
$C$	Abflussbeiwert, siehe Tabelle 40
$A$	wirksame, im Grundriss projizierte Niederschlagsfläche in m <sup>2</sup>

Die Bemessung der Entwässerungsanlagen erfolgt auf ein fünfjähriges Starkregenereignis. Eine Bemessung auf statistisch seltenere Starkregenereignisse, wie ein Ereignis der Wiederkehrperiode von 100 Jahren, ist nicht wirtschaftlich und würde sehr große Leitungsquerschnitte nach sich ziehen, die nur in den seltensten Fällen komplett ausgenutzt würden. Daher werden diese Regenereignisse über die Notentwässerung abgeführt, um eine Beschädigung des Daches durch Überbelastung oder eindringendes Wasser zu vermeiden. Die Notentwässerung trägt dabei mindestens die Differenz zwischen dem Bemessungsregenwasserabfluss und einem hundertjährlichen Starkregenereignis ab. Sie wird auch dann benötigt, wenn aufgrund verstopfter Abläufe der Wasserspiegel auf dem Dach ansteigt (Sedlbauer et al. 2010). Die Notentwässerung kann beispielsweise durch Notüberläufe, die durch die Attika geführte werden erfolgen. Das aus den Notüberläufen austretende Wasser wird in der Regel über Speier auf geeignete Grünbereiche abgeführt. Die Bemessung des Mindestabflussvermögens der Notentwässerung erfolgt ebenfalls nach DIN 1986-100:2016-12:

$$Q_{Not} = (r_{5,100} - r_{D,T} \cdot C) \cdot A \quad (\text{Gl. 7})$$

mit

$Q_{Not}$	Mindestabflussvermögen der Notentwässerung in l/s
$r_{D,T}$	Bemessungsregenspende in l/(s m <sup>2</sup> ), siehe Tabelle 38
$C$	Abflussbeiwert, siehe Tabelle 40
$A$	wirksame, im Grundriss projizierte Niederschlagsfläche in m <sup>2</sup>

Die Dimensionierung der Notüberläufe hängt von der Überflutungshöhe auf dem Dach ab, welche wiederum in der Planung des Gebäudes vom Tragwerksplaner vorgegeben wird. Da aber genaue Angaben über die Einstauhöhe, die Tragstruktur und die zulässige Auflast aus Regenwasser nicht vorhanden sind, soll an dieser Stelle auf eine exakte Dimensionierung der Notüberläufe verzichtet und nur das Mindestabflussvermögen der Notentwässerung betrachtet werden. Da es sich beim Dach der Musterliegenschaft um ein Flachdach handelt, entspricht die wirksame Niederschlagsfläche nach DIN EN 12056-3:2000 der

Fläche des Dachs. Diese beträgt 118 m<sup>2</sup> für die Dachfläche über dem Erdgeschoss und 94 m<sup>2</sup> für die Dachfläche über dem Obergeschoss.

Da die Dachfläche über dem Erdgeschoss in zwei räumlich getrennte Dachflächen unterteilt wird, muss auch jede Dachfläche entsprechend entwässert werden. Die Dachfläche der Dachterrasse im Osten des Gebäudes beträgt 32 m<sup>2</sup>, während die Dachfläche im Westen des Gebäudes eine Fläche von 86 m<sup>2</sup> aufweist. Die Anforderungen an die Leitungsdurchmesser der Entwässerung in Abhängigkeit der berechneten Abflusswerte können Tabelle 39 entnommen werden.

Tabelle 39: Mindestabflusswerte von Rohrleitungen nach DIN EN 12056-3:2000

Nenngröße vom Einsteckende am Dach		Schwerkraftentwässerung	
Außendurchmesser	Innendurchmesser	Mindestabflusswert	Stauhöhe
in mm	in mm	in l/s	in mm
40	40	-	-
50	50	0,9	35
63	60	1,0	
75	70	1,7	
80	75	2,6	
90	85	3,0	
110	100	4,5	

Der Abflussbeiwert C gibt an, welcher Anteil am Gesamtniederschlag direkt in die Abwasserbeseitigungseinrichtungen fließt. Flächen mit einem hohen Versiegelungsgrad haben einen hohen Abflussbeiwert, während offene oder nur teilversiegelte Flächen einen niedrigeren Abflussbeiwert aufweisen. Obwohl Gebäudehüllen in der Regel als versiegelte Flächen gelten, kann nach demselben Vorgehen auch der Abflussbeiwert für Dächer ermittelt werden (Sedlbauer et al. 2010). Ausgewählte Abflussbeiwerte können Tabelle 40 entnommen werden.

Tabelle 40: Ausgewählte Abflussbeiwerte nach DIN 1986-100:2016-12

Art der Fläche	Spitzenabflussbeiwert	Mittlerer Abflussbeiwert
	C <sub>s</sub>	C <sub>m</sub>
Flachdach	Metall, Glas, Faserzement	0,9
	Abdichtungsbahnen	0,9
	Kiesschüttung	0,8
Begrünte Dachflächen, Neigung ≤ 5°	Intensivbegrünung ≥ 30 cm Aufbaudicke	0,1
	Extensivbegrünung ≥ 10 cm Aufbaudicke	0,2
	Extensivbegrünung < 10 cm Aufbaudicke	0,3
Verkehrsflächen	Betonflächen	0,9
	Pflasterflächen Fugenteil > 15 %	0,6
	Rasengittersteine (Parkplatz)	0,2
	Rasen, flaches Gelände	0,1

Im Folgenden werden die einzelnen Dachaufbauten

- D01 – Warmdach mit freiliegender Dachbahn,
- D02 – Umkehrdach mit Kies,
- D03 – extensiv begrüntes Dach und
- D04 – intensiv begrüntes Retentionsdach

erläutert und die Regenwasserrückhaltung sowie die Entwässerungsanlagen bemessen. Die vier untersuchten Varianten unterscheiden sich teilweise erheblich hinsichtlich des Eigengewichts und der auf dem Dach zurückgehaltenen Regenwassermenge. Dies wirkt sich wesentlich auf die Dimensionierung des Dachtragwerks aus.

Die für das Tragwerk notwendige Menge Stahlbeton beeinflusst wiederum die Ergebnisse der Ökobilanz. Aus diesem Grund wird für jede Dachvariante eine überschlägige Bemessung durchgeführt. Dadurch ergeben sich variierende Dicken der Stahlbeton-Dachdecke in Abhängigkeit des Dachaufbaus. Prinzipiell ist es möglich die verschiedenen Dachflächen über dem Erdgeschoss und dem Obergeschoss in Abhängigkeit der Nutzung verschieden auszugestalten. Im weiteren Verlauf wird jedoch angenommen, dass sämtliche Dachflächen der Musterliegenschaft in der jeweiligen Variante ausgeführt werden.

### **D01 – Warmdach mit freiliegender Abdichtung**

In der Variante D01 wird die Deckung und die Abdichtung des Dachs über eine Kunststoffdachbahn hergestellt. Die Abdichtungsbahn befindet sich über der Dämmebene. Es wird keine zusätzliche Auflast über der Abdichtungsbahn vorgesehen, sodass die Windsogkräfte durch kraftschlüssige Verbindung mit der Dachdecke abgetragen werden müssen. Daher müssen sowohl die Wärmedämmung als auch die Abdichtungsbahn vollflächig mit der folgenden Schicht verklebt oder mechanisch befestigt werden, um sie in der Lage zu sichern (Sedlbauer et al. 2010). Grundsätzlich sind an dieser Stelle mechanische Befestigungen zu bevorzugen, um eine bessere Rückbaubarkeit zu ermöglichen. Da die Dachbahn bei der Variante D01 direkt der Außenluft und der Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist, müssen UV-beständige Materialien verwendet werden, da ansonsten die Gefahr der Versprödung der Materialien besteht. Durch die Versprödung können Undichtigkeiten in der Abdichtungsebene entstehen (Hestermann/Rongen 2018).

Da der Dachaufbau der Variante D01 sehr leicht ist, kann auch die Unterkonstruktion entsprechend leicht ausgeführt werden. Möglich ist hier unter anderem eine Brettstapeldecke. Um jedoch eine Vergleichbarkeit im Hinblick auf den Mehraufwand an Material für die Unterkonstruktion zwischen den einzelnen Varianten zu ermöglichen, wird bei der Variante D01 ein Dachtragwerk aus Stahlbeton angenommen. Als Dämmmaterial wird expandierter Kork verwendet. Expandierter Kork ist ein Dämmmaterial aus nachwachsenden Rohstoffen, das sich durch eine hohe Druckfestigkeit auszeichnet und im Vergleich mit anderen Dämmstoffen relativ unempfindlich gegen Feuchtigkeit ist. Neben Kork können weitere Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen wie beispielsweise Holzfaserdämmplatten verwendet werden. Holzfaserdämmplatten weisen jedoch höhere Umweltwirkungen im Hinblick auf das Treibhauspotential sowie den nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf auf. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden die ökobilanziellen Unterschiede aufgezeigt. Die Dicke der Abdichtungsbahn beträgt nach DIN 18531-3:2017-07 bei ungenutzten Dächern 1,2 mm. In Abbildung 75 und der Tabelle 41 ist der Aufbau der Variante D01 dargestellt.

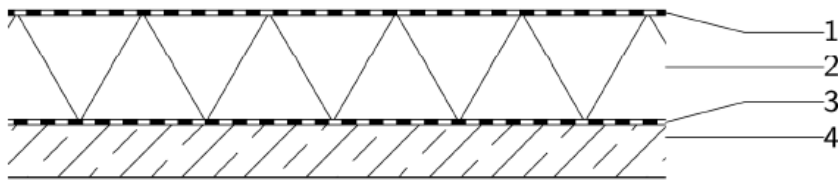


Abbildung 75: Dachaufbau D01 Warmdach mit freiliegender Abdichtung

Tabelle 41: Schichtenfolge und Schichtdicken des Dachaufbaus D01

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Dachbahn	0,12
2	expandierter Kork	20,00
3	Dampfsperre	0,03
4	Stahlbeton C25/30	15,00

Die Auflast aus der Korkdämmung und der Kunststoffabdichtungsbahn führt zu einer ständigen Last durch das Eigengewicht von  $g = 0,31 \text{ kN/m}^2$ . Das Eigengewicht des Stahlbetons führt zu einer Last von  $g = 3,75 \text{ kN/m}^2$ . Zusätzlich muss die veränderliche Last aus anstehendem Wasser bei Starkregenfällen angesetzt werden. Die Unterkante der Notüberläufe muss sich nach Tabelle 39 mindestens 35 mm oberhalb des Dachablaufes befinden, um die erforderliche Druckhöhe für den Dachablauf sicherzustellen. Somit beträgt die veränderliche Auflast aufgrund des angestauten Wassers  $q = 0,35 \text{ kN/m}^2$ . Die sich daraus ergebende erforderliche Bauteilhöhe der Decke beträgt für die Variante D01 15,00 cm.

Für die Bestimmung des Regenwasserabflusses wird nach Tabelle 40 für die Variante D01 ein Spitzenabflussbeiwert  $C_s$  von 1,0 angesetzt. Die Bemessungsregenspende unter Berücksichtigung des Klimaänderungsfaktors beträgt nach Tabelle 38 für die Bemessung der Entwässerungsanlage  $r_{(5,5)} = 0,036 \text{ l/(s m}^2\text{)}$ . Dieser Wert entspricht der Expositionsklasse 1. Für die Bemessung der Notfallentwässerung wird der Wert der Expositionsklasse 3 mit  $r_{(5,100)} = 0,064 \text{ l/(s m}^2\text{)}$  angesetzt. In der Tabelle 42 sind die resultierenden Regenwasserabflüsse für die Entwässerungssysteme und für die Notentwässerung getrennt für die Dachflächen über dem EG und über dem OG dargestellt.

Tabelle 42: Regenwasserabfluss je Dachfläche für Dachaufbau D01 Warmdach mit freiliegender Abdichtung in l/s

Dachfläche	EK		
EG Ost	1	$Q_T = 0,036 \text{ l/(s m}^2\text{)} \cdot 1,0 \cdot 32 \text{ m}^2$	= 1,15
	3	$Q_{\text{Not}} = (0,064 \text{ l/(s m}^2\text{)} - 0,036 \text{ l/(s m}^2\text{)} \cdot 1,0) \cdot 32 \text{ m}^2$	= 0,89
EG West	1	$Q_T = 0,036 \text{ l/(s m}^2\text{)} \cdot 1,0 \cdot 86 \text{ m}^2$	= 3,00
	3	$Q_{\text{Not}} = (0,064 \text{ l/(s m}^2\text{)} - 0,036 \text{ l/(s m}^2\text{)} \cdot 1,0) \cdot 86 \text{ m}^2$	= 2,41
OG	1	$Q_T = 0,036 \text{ l/(s m}^2\text{)} \cdot 1,0 \cdot 94 \text{ m}^2$	= 3,37
	3	$Q_{\text{Not}} = (0,064 \text{ l/(s m}^2\text{)} - 0,036 \text{ l/(s m}^2\text{)} \cdot 1,0) \cdot 94 \text{ m}^2$	= 2,62

Für die Dachfläche über dem Erdgeschoss im Ostteil des Gebäudes kann nach Tabelle 39 eine Entwässerungsleitung mit einem Außendurchmesser von 75 mm verwendet werden. Bei der Dachfläche über dem OG kann die Entwässerung über eine Entwässerungsleitung mit dem Außendurchmesser von 110 mm erfolgen. In der westlichen Dachfläche des Gebäudes werden aufgrund der Geometrie der Dachfläche mehrere Entwässerungsleitungen vorgesehen. Der Versprung im Nordteil des Gebäudes, der in Richtung Westen befindliche schmalere Teil des Gebäudes und der große südliche Bereich werden durch getrennte Entwässerungsleitungen entwässert.

Nach der Gleichung (Gl. 8)

$$n_{DA} = \frac{Q}{Q_{DA}} \quad (\text{Gl. 8})$$

mit

$n_{DA}$	Mindestanzahl der Dach- bzw. Rinnenabläufe
$Q$	Regenwasserabfluss von einer Dachfläche in l/s
$Q_{DA}$	Abflussvermögen des gewählten Dachablaufs in l/s

beträgt das erforderliche Abflussvermögen  $Q_{DA}$  bei drei Abläufen 1,0 l/s. Somit können für die Dachfläche EG West drei Entwässerungsleitungen mit einem Außennendurchmesser von 63 mm verwendet werden.

## D02 – Umkehrdach mit Kiesschicht

Bei einem Umkehrdach befindet sich die Dämmebene oberhalb der Abdichtungsschicht. Dadurch ist die Abdichtungsebene der direkten Sonneneinstrahlung und mechanischen Einwirkungen entzogen und durch die Dämmung geschützt. Um die Dämmelemente vor dem Abheben durch Windsog oder das Aufschwimmen infolge Unterspülung zu schützen, wird im vorliegenden Fall ein Umkehrdach mit einer dampfdurchlässigen Deckschicht aus Kies ausgeführt. Durch die entstehende Auflast sind die Dämmplatten in der Lage gesichert. Der Großteil des ankommenden Regenwassers wird über die Oberfläche der Dämmebene abgetragen, allerdings kann durch die Fugen zwischen den Dämmplatten Wasser in die Zwischenräume gelangen. Da die Dämmung so von anfallendem Niederschlagswasser unterspült und umgeben wird, müssen Dämmmaterialien verwendet werden, die eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Wasser aufweisen (ZVDH 2017). Ein geeigneter Dämmstoff, der typischerweise Anwendung findet, ist XPS.

Gegenüber einem Warmdach führt die Unterströmung der Dämmebene durch Regenwasser zu einer geringeren Temperatur an der Ebene zwischen Stahlbetondecke und Wärmedämmung. Dementsprechend muss der rechnerisch ermittelte U-Wert eines Umkehrdachs erhöht werden. Die nach DIN 4108-2:2013-02 typischerweise zu verwendenden Zuschlagswerte können Tabelle 43 entnommen werden.

Tabelle 43: Zuschlagswerte  $\Delta U$  für Umkehrdächer nach DIN 4108-2:2013-02

Anteil des Wärmedurchlasswiderstands raumseitig der Abdichtung am Gesamtwärmedurchlasswiderstand	Zuschlagswert $\Delta U$
in %	in $W/(m^2K)$
< 10	0,05
10 - 50	0,03
> 50	0,00

Um denselben U-Wert wie mit einer Warmdachkonstruktion zu erhalten, können die Zuschlagswerte durch eine Erhöhung der Dämmschichtdicke ausgeglichen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung einer Dämmschicht aus XPS-Dämmung in Verbindung mit einer wasserableitenden Trennlage oberhalb der Dämmebene. Durch die diffusionsoffene Trennlage wird der Großteil des anfallenden Regenwassers über die obere Trennlage abgeführt (Sedlbauer et al. 2010). Da zwischen Auflast und Dämmebene stets eine Trennlage vorgesehen werden muss, um das Eindringen von Auflastmaterial in die Fugen zwischen den Dämmplatten zu verhindern, kann das Gebäude durch die Verwendung einer Trennlage, die die Anforderungen an die Wasserableitung erfüllt, vor zusätzlichen Wärmeverlusten geschützt werden.

Da die Abdichtungsbahn mechanischen und thermischen Einwirkungen entzogen ist, muss sie keine besonderen Anforderungen an die UV-Beständigkeit erfüllen. Dadurch verlängern sich die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit im Hinblick auf die Dichtigkeit.

Für die Abdichtung bieten sich aus Kostengründen Kunststoffdachbahnen an. Nach DIN 18531-3:2017-07 erhöht sich die Mindestdicke einer Kunststoffdachbahn bei genutzten Dächern auf 1,5 mm. Sowohl für die Abdichtungsbahn als auch für die Dämmung ist eine lose Verlegung möglich. Dies erleichtert den Rückbau und die sortenreine Trennung der einzelnen Schichten. Um die gestoßenen Wärmedämmplatten gegen Verschieben zu sichern, werden die einzelnen Platten über Stufen- oder Hakenfalze miteinander verbunden. Der resultierende Bauteilaufbau für die Variante D02 kann der Abbildung 76 und der Tabelle 44 entnommen werden.

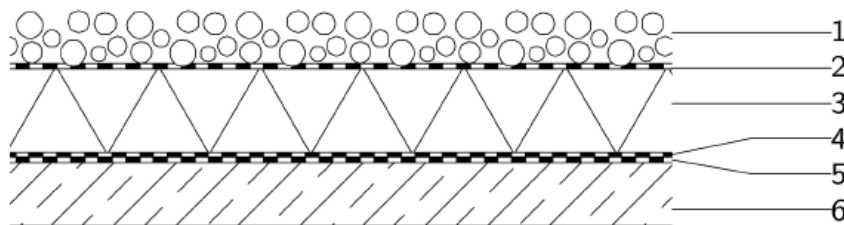


Abbildung 76: Dachaufbau D02 Umkehrdach mit Kies

Tabelle 44: Schichtenfolge und Schichtdicken des Dachaufbaus D02

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Kiesdeckung	10,00
2	PE/PP-Vlies	0,10
3	XPS-Wärmedämmung	16,00
4	Dachbahn	0,15
5	PE/PP-Vlies	0,10
6	Stahlbeton C25/30	17,00

Die ständige Last der Bauteilaufbauten über der tragenden Decke beträgt  $g = 2,09 \text{ kN/m}^2$  und das Eigengewicht der Stahlbetondecke  $g = 4,25 \text{ kN/m}^2$ . Die Kiesschicht ist dabei bereits vollständig mit Wasser gesättigt. Da sich die Unterkante der Notentwässerung auch hier 35 mm oberhalb der Oberkante der Kiesschicht befindet, beträgt die Auflast aus anstehendem Wasser im Starkregenfall  $q = 0,35 \text{ kN/m}^2$ . Die Bemessung der Stahlbetondecke ergibt eine notwendige Dicke von 17,00 cm. Für die Bemessung der Entwässerungsanlagen wird für die Variante D02 nach Tabelle 40 ein Spitzenabflussbeiwert von  $CS = 0,8$  verwendet. Die Bemessungsregenspende sowie die Dachflächen bleiben identisch zur Variante D01. Die resultierenden Regenwasserabflüsse für die Entwässerung und die Notentwässerung können Tabelle 45 entnommen werden.

Tabelle 45: Regenwasserabfluss je Dachfläche für Dachaufbau D02 in l/s

Dachfläche	EK	
EG Ost	1	$Q_T = 0,036 \text{ l/(s m}^2) \cdot 0,8 \cdot 32 \text{ m}^2 = 0,92$
	3	$Q_{Not} = (0,064 \text{ l/(s m}^2) - 0,036 \text{ l/(s m}^2) \cdot 0,8) \cdot 32 \text{ m}^2 = 1,13$
EG West	1	$Q_T = 0,036 \text{ l/(s m}^2) \cdot 0,8 \cdot 86 \text{ m}^2 = 2,48$
	3	$Q_{Not} = (0,064 \text{ l/(s m}^2) - 0,036 \text{ l/(s m}^2) \cdot 0,8) \cdot 86 \text{ m}^2 = 3,06$
OG	1	$Q_T = 0,036 \text{ l/(s m}^2) \cdot 0,8 \cdot 94 \text{ m}^2 = 2,69$
	3	$Q_{Not} = (0,064 \text{ l/(s m}^2) - 0,036 \text{ l/(s m}^2) \cdot 0,8) \cdot 94 \text{ m}^2 = 3,32$



Für die Dachfläche über dem EG im Ostteil des Gebäudes reduziert sich im Vergleich zur Variante D01 für die Variante D02 nach Tabelle 39 der Außendurchmesser auf 63 mm. Bei der Dachfläche über dem OG kann der Durchmesser auf 90 mm reduziert werden. Für die westliche Dachfläche werden drei Abflussrohre mit einem Außendurchmesser von je 40 mm installiert. Die Dachabläufe müssen für die Variante D02 mit einem Kiesfangkorb oberhalb der Kiesoberfläche ausgeführt werden, um zu verhindern, dass Kies oder sonstige Partikel der Auflast in das Abflussrohr fallen und dort zu Beschädigungen führen. Die Bemessungswerte der Notabflüsse können Tabelle 45 entnommen werden. Im Vergleich zu den Abflusswerten der Variante D01 sind die Notabläufe größer zu dimensionieren. Dies liegt daran, dass der Spitzenabflussbeiwert nur auf die Berechnungsregenspende der Entwässerungsanlage angerechnet wird, nicht aber auf die Notentwässerung. Bei der Notentwässerung wird davon ausgegangen, dass die Dachoberfläche bereits überflutet ist und somit ihre Beschaffenheit keinen Einfluss mehr auf die Regenwasserrückhaltung hat.

Durch die Variante D02 können zusätzliche Umweltpotentiale erschlossen werden. So wird durch die Kiesauflast bereits eine Verbesserung der Regenwasserrückhaltung erreicht. Ebenso ist die Konstruktion durch die lose Verlegung der Platten und der Kunststoffabdichtungsbahn sehr leicht rückbaubar und wiederverwertbar. Nachteilig ist in einer ersten Betrachtung zu nennen, dass eine schwerere Unterkonstruktion aus Beton nötig ist.

### **D03 – Extensiv begrüntes Dach**

In einem weiteren Anpassungsschritt sollen über ein extensives Gründach ohne gesonderte Retentionsmaßnahmen weitere Klima- und Umweltpotentiale erschlossen werden. Bei einem Gründach wird im Allgemeinen zwischen einem extensiv begrüntem und einem intensiv begrüntem Dach unterschieden. Die Extensivbegrünung ist sehr wartungsarm und die Bepflanzung ist geprägt durch Stauden, Kleingehölze und Moose. Eine Extensivbegrünung kann über vier verschiedene Varianten hergestellt werden, wobei sich die Anzahl der möglichen Pflanzarten stetig erhöht (Pfoser et al. 2013). Die vier Varianten sind:

- Direktbegrünung auf Ziegel-/Steinplatten,
- Textilsystem,
- Textil-Substrat-System,
- Substratschüttung.

Für die Variante D03 wird ein extensiv begrüntes Flachdach mit einer Substratschüttung gewählt. Dadurch erhöht sich die Anzahl der geeigneten Pflanzenarten gegenüber der Direktbegrünung, dem Textilsystem und dem Textil-Substrat-System wesentlich. Dies erweitert die gestalterische Freiheit aber auch die Möglichkeiten zur Erschließung von Klima- und Umweltpotentialen. Das Wasserrückhaltevolumen einer 15 cm dicken Substratschicht liegt im Bereich zwischen 30 und 50 l/m<sup>2</sup>. Gründächer können sowohl als Warmdach, als auch als Umkehrdach konstruiert werden. Aufgrund der größeren Vielfalt an verwendbaren, ökologischen Dämmstoffen wird die Unterkonstruktion des hier betrachteten Gründachs als Warmdach mit einer Betonunterkonstruktion ausgeführt. Als Dämmmaterial wird erneut expandierter Kork gewählt. Die Dicke der Substratschicht wird ohne weitere Begründung auf 8 cm festgelegt. Der Schichtenaufbau der Variante D03 ist in Abbildung 77 und der Tabelle 46 abgebildet. Auf die Auswahl der Pflanzen wird in Kapitel 8.5.2 eingegangen.

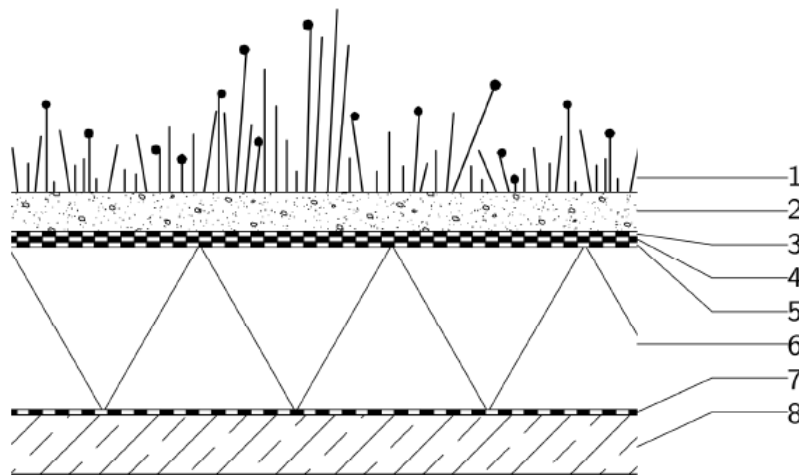


Abbildung 77: Dachaufbau D03 extensiv begrüntes Dach

Tabelle 46: Schichtdicken der Variante D03

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Begrünung	-
2	Vegetationssubstrat	8,00
3	Wurzelschutzbahn	0,10
4	PE/PP-Vlies	0,10
5	Dachbahn	0,15
6	Expandierter Kork	32,00
7	Dampfsperre	0,03
8	Stahlbeton C25/30	16,50

Für die Entwässerung der Variante D03 wird nach Tabelle 40 ein Abflussbeiwert von  $C_s = 0,5$  verwendet, da der Aufbau des extensiven Gründachs niedriger als 10 cm ist. Die Bemessungsregenabflüsse für die Entwässerung und die Notentwässerung für die Ausführungsvariante D03 können der Tabelle 47 entnommen werden.

Tabelle 47: Regenwasserabfluss je Dachfläche für Dachaufbau D03 extensiv begrüntes Dach in l/s

Dachfläche	EK		
EG Ost	1	$Q_T = 0,036 \text{ l/(s m}^2) \cdot 0,5 \cdot 32 \text{ m}^2$	= 0,58
	3	$Q_{Not} = (0,064 \text{ l/(s m}^2) - 0,036 \text{ l/(s m}^2) \cdot 0,5) \cdot 32 \text{ m}^2$	= 1,48
EG West	1	$Q_T = 0,036 \text{ l/(s m}^2) \cdot 0,5 \cdot 86 \text{ m}^2$	= 1,55
	3	$Q_{Not} = (0,064 \text{ l/(s m}^2) - 0,036 \text{ l/(s m}^2) \cdot 0,5) \cdot 86 \text{ m}^2$	= 3,99
OG	1	$Q_T = 0,036 \text{ l/(s m}^2) \cdot 0,5 \cdot 94 \text{ m}^2$	= 1,68
	3	$Q_{Not} = (0,064 \text{ l/(s m}^2) - 0,036 \text{ l/(s m}^2) \cdot 0,5) \cdot 94 \text{ m}^2$	= 4,33

Für die Dachfläche über dem EG im Ostteil des Gebäudes reduziert sich im Vergleich zu den Varianten D01 und D02 für die Variante D03 nach Tabelle 39 der Außendurchmesser auf 40 mm. Für diesen Leitungsdurchmesser wird somit keine minimale Stauhöhe mehr benötigt. Bei der Dachfläche über dem OG kann der Durchmesser auf 75 mm reduziert werden. Für die westliche Dachfläche werden drei Abflussrohre mit einem Außendurchmesser von je 40 mm installiert. Die Dachabläufe müssen für die Variante D03 mit einem Laubfanggitter am Eingang des Gullys ausgeführt werden, um ein Verstopfen der Abflussleitung zu vermeiden.

Diese Laubfanggitter müssen regelmäßig und immer nach Starkregenereignissen gesäubert werden, um einen optimalen Abfluss zu ermöglichen. Weiterhin zeigt sich, dass die Notabflüsse größer dimensioniert werden müssen als bei den Varianten D01 und D02.

Für die Dimensionierung der Stahlbetondecke wurde das Eigengewicht aus den Aufbauten oberhalb der Stahlbetondecke mit  $1,32 \text{ kN/m}^2$  angesetzt, was zu großen Teilen auf die Substratschicht zurückzuführen ist. Für den maßgebenden Fall der Dachfläche über dem EG wird zwar keine Mindeststauhöhe benötigt. Dennoch wird davon ausgegangen, dass sich das Wasser bis zu einer Höhe von 35 mm staut, was eine veränderliche Last von  $q = 0,35 \text{ kN/m}$  bedeutet. Die Mindestdicke der Stahlbetondecke beträgt für die Variante D03 16,50 cm. Dadurch ergibt sich ein Eigengewicht von  $4,13 \text{ kN/m}^2$ .

Über das extensive Gründach können bereits eine Vielzahl an Klima- und Umweltpotentialen erschlossen werden. Über die Verdunstungskühle findet eine Verbesserung des Mikroklimas statt. Zusätzlich können über eine geeignete Pflanzenauswahl die Artenvielfalt sowie die Feinstaubbindung verbessert werden. Weiterhin sind die einzelnen Schichten gut trennbar und tragen damit zu einer hohen sortenreinen Rückbaubarkeit bei. Ebenso führt bereits ein extensives Gründach ohne zusätzliche Retentionsmaßnahmen zu einer Verbesserung der Regenwasserrückhaltung und einer Entlastung der öffentlichen Kanalsysteme.

#### **D04 – Intensiv begrüntes Retentionsdach mit Drossel**

Im nächsten Anpassungsschritt wird die Regenwasserrückhaltung der Dachflächen durch zusätzliche Retentionsmaßnahmen weiter erhöht. Dadurch erweitert sich die Auswahl der geeigneten Pflanzen wodurch weitere Umwelt- und Klimapotentiale erschlossen werden können. Retentionsdächer sind darauf angelegt, gerade bei Starkregenereignissen die Spitzenniederschlagshöhen zurückzuhalten und verzögert kontrolliert in das kommunale Entwässerungssystem abzuführen (Pfoser et al. 2013). Durch diese Eigenschaft sind Retentionsdächer bei zunehmenden Niederschlagsereignissen mit großen Niederschlagshöhen gut geeignet.

Bei Retentionsdächern werden unterhalb der Vegetationsschicht in der Drainageebene spezielle Retentionssysteme verwendet. Ziel der Retentionssysteme ist die Schaffung von Rückhalteraum unterhalb der Substratschicht, sodass das Niederschlagswasser für einen definierten Zeitraum zurückgehalten werden kann. Dabei wird zwischen folgenden Systemen unterschieden (Optigrün 2019):

- Festkörperdrainage,
- Wasserretentionsboxen.

Bei der Festkörperdrainage werden unter der Substratschicht spezielle Kunststoffdrainageplatten mit Hohlkammern eingebaut. Durch die mäandrierte Wegeführung in den Platten verlängert sich der Fließweg des Wassers so stark, dass sich der Abfluss des Wassers verzögert (Pfoser et al. 2013). Alternativ können anstatt der Mäanderplatten Retentionsboxen verwendet werden, in denen das Wasser gespeichert wird. Die Abflusskontrolle erfolgt dabei über eine Drossel, die auf einen festen Abflusswert eingestellt wird. Bei einem Starkregenereignis versickert das Wasser durch das Substrat und sammelt sich in den Retentionsboxen. Der Wasserspiegel in den Boxen steigt an, während Teile des Niederschlags durch den Gully mit einer festgelegten Abflussrate abfließen. Der Abfluss wird auch nach dem Ende des Regenereignisses beibehalten, bis das Wasser eine definierte ständige Einstauhöhe erreicht hat. Wird ein Starkregenereignis erwartet, kann die Drossel im Vorfeld geöffnet werden, um den Wasserspiegel um die zu erwartende Niederschlagshöhe zu senken. Die Steuerung der Drossel erfolgt über ein automatisiertes System, das auf offizielle Wetterdaten und Wettervorhersagen reagiert. Die Einstauhöhe ist bei einem Retentionsdach wichtig, um einen konstanten kapillaren Wassertransport in die Substratebene zu ermöglichen (Mann/Klinger 2015). Dadurch kann das Niederschlagswasser zur Bewässerung der Pflanzen verwendet werden.

Durch die Verdunstung des Wassers wird der Umgebung bzw. dem Dach latent Wärme entzogen und es tritt ein Kühleffekt auf. Infolge der Rückhaltung des Regenwassers stellt ein Retentionsdach eine Besonderheit gegenüber einer üblichen Dachentwässerung dar. Daher müssen die Parameter

- Einstauvolumen,
- Wassermenge / Zeiteinheit und
- Entleerungszeit

im Vorfeld geklärt werden. Durch die zusätzliche Auflast des aufgestauten Wassers werden spezielle Anforderungen an das Tragwerk gestellt (Hestermann/Rongen 2018). Bei der Verwendung von Retentionsboxen sollte die Dachneigung möglichst  $0^\circ$  betragen, um eine gleichmäßige Wasserverteilung in den Boxen zu ermöglichen (Mann/Klinger 2015).

Die Wahl und die Dimensionierung des Retentionssystems hängen hauptsächlich von gesetzlichen Vorgaben der Einleitbeschränkung in das öffentliche Kanalnetz ab. Über die Festkörperdrainage kann bereits eine große Menge an Regenwasser zurückgehalten werden. Allerdings ist eine längerfristige Speicherung des Regenwassers nicht möglich. Das Niederschlagswasser wird zeitverzögert an die Kanalisation abgegeben. Die Verwendung des Systems mit Retentionsboxen ist in der Fertigung deutlich aufwendiger. Durch den sehr geringen Abflussbeiwert fließt aber so gut wie kein Wasser in die Entwässerungssysteme, was zu einer deutlichen Entlastung führt. Um die oberste Bandbreite an konstruktiven Lösungsvorschlägen abzudecken, wird für die Variante D04 eine Retentionsbox mit Drosselsystem verwendet. Der resultierende Bauteilaufbau für die Variante D04 kann der Abbildung 78 und der Tabelle 48 entnommen werden.

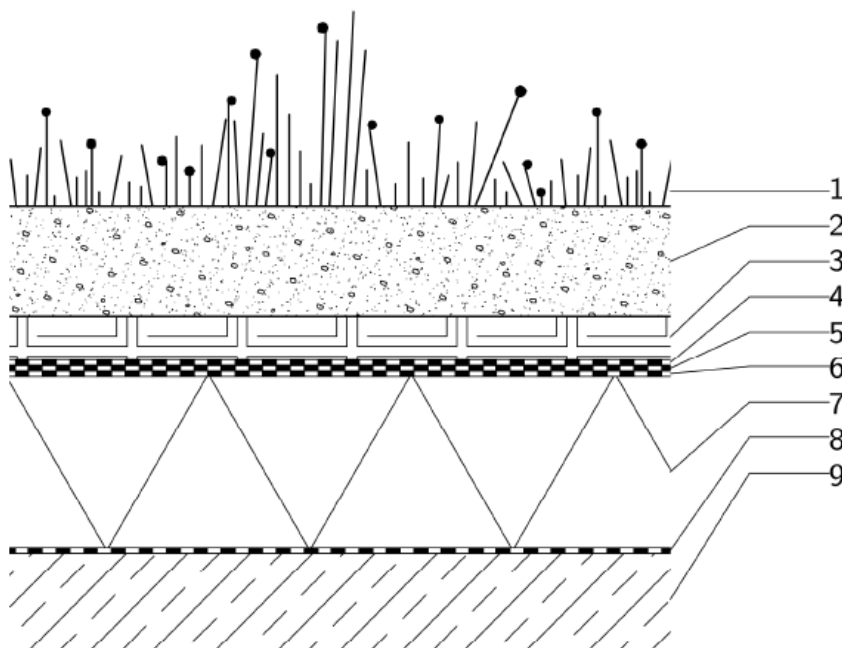


Abbildung 78: Dachaufbau D04 intensiv begrüntes Retentionsdach mit Drossel

Tabelle 48: Schichtenfolge und Schichtdicken des Dachaufbaus D04

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Begrünung	-
2	Vegetationssubstrat	20,00
3	Retentionsbox WRB 85L	8,50
4	Wurzelschutzbahn	0,10
5	PE/PP-Vlies	0,10
6	Dachbahn	0,15
7	Expandierter Kork	32,00
8	Dampfsperre	0,03
9	Stahlbeton C25/30	19,00

Oberhalb der Retentionsboxen ist prinzipiell jeder Aufbau, von einem extensiv begrüntem über ein intensiv begrüntes Flachdach bis hin zu Verkehrsflächen auf dem Dach denkbar (Hestermann/Rongen 2018). Um die obere Grenze der Bandbreite an Lösungsvorschlägen abzudecken, wird für das Retentionsdach ein intensiv begrünter Dachaufbau gewählt. Durch die dickere Substratschicht erweitert sich auch das Spektrum der geeigneten Pflanzenarten, sodass eine Bepflanzung bis zu Kleingehölzen möglich ist. Wie bei der Variante D03 ist die Abdichtung durch eine Schutzfolie gegen Durchwurzelung zu sichern (FLL 2018a). Durch die anspruchsvolleren Pflanzen ist der Pflegeaufwand bei einem intensiv begrüntem Dach höher als bei einem extensiven Gründach. Um den Pflegeaufwand so gering wie möglich zu halten, sollte bei der Auswahl der Begrünung auf Pflanzen geachtet werden, die geringe Ansprüche an die Versorgung mit Wasser und Nährstoffen stellen.

Die Höhe der Retentionsbox ist abhängig von den zu erwartenden Niederschlagshöhen, der Anstauhöhe auf dem Dach, Einleitbeschränkungen in das öffentliche Kanalnetz sowie dem optimierten Abfluss durch die Drossel. Der ständige Wasserstand in der Retentionsbox wird mit 6 cm angenommen. Über Kapillarsäulen kann das anstehende Wasser zur Verdunstung an die Substratschicht abgegeben werden. Kurzzeitig anstehendes Regenwasser infolge von Starkniederschlägen wird toleriert und nicht über die Notentwässerung abgeführt. Die Auflast aus dem intensiven Gründach beträgt  $g = 3,92 \text{ kN/m}^2$ . Darin enthalten sind bereits der permanente Wasseranstau von 6 cm in der Retentionsbox sowie die Gewichtskraft der gesättigten Substratschicht. Der zusätzliche Wasseranstau infolge von Starkregenfällen wird aufgrund der nicht vorhandenen Notentwässerung mit  $q = 0,6 \text{ kN/m}^2$  angesetzt. Damit ergibt sich für die Variante D04 eine Dicke der Stahlbetondecke von 19,00 cm, was einem Eigengewicht von  $g = 4,75 \text{ kN/m}^2$  entspricht.

Für die Entwässerung der Variante D04 müssen keine gesonderten Berechnungen durchgeführt werden. Sämtliches Wasser, das auf dem Dach anfällt, wird in den Retentionsboxen zurückgehalten und mit sehr geringen Abflussraten zeitlich verzögert an die Kanalisation abgegeben. Der Regenwasserabfluss kann an der Drossel nach Bedarf eingestellt werden.

## Analyse

### Lebenszyklusanalyse

Bei der Auswertung der Ökobilanz der Dachvarianten in der Abbildung 79 und Abbildung 80 zeigt sich, dass die Variante D01 wie erwartet in beiden Wirkungskategorien die niedrigsten Werte aufweist. Positiv wirkt sich dabei die Verwendung der Dämmung aus expandiertem Kork aus, welcher als natürlicher Dämmstoff eine große Menge an CO<sub>2</sub> speichert und somit Gutschriften in die Bilanzierung einbringt.

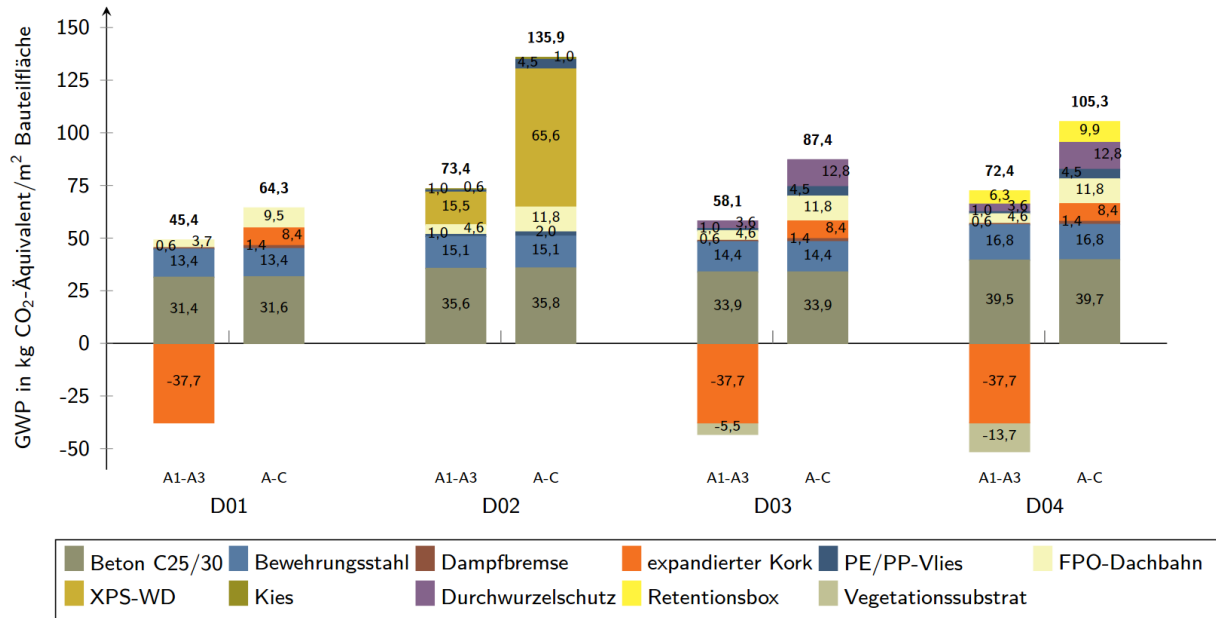


Abbildung 79: GWP Dach in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

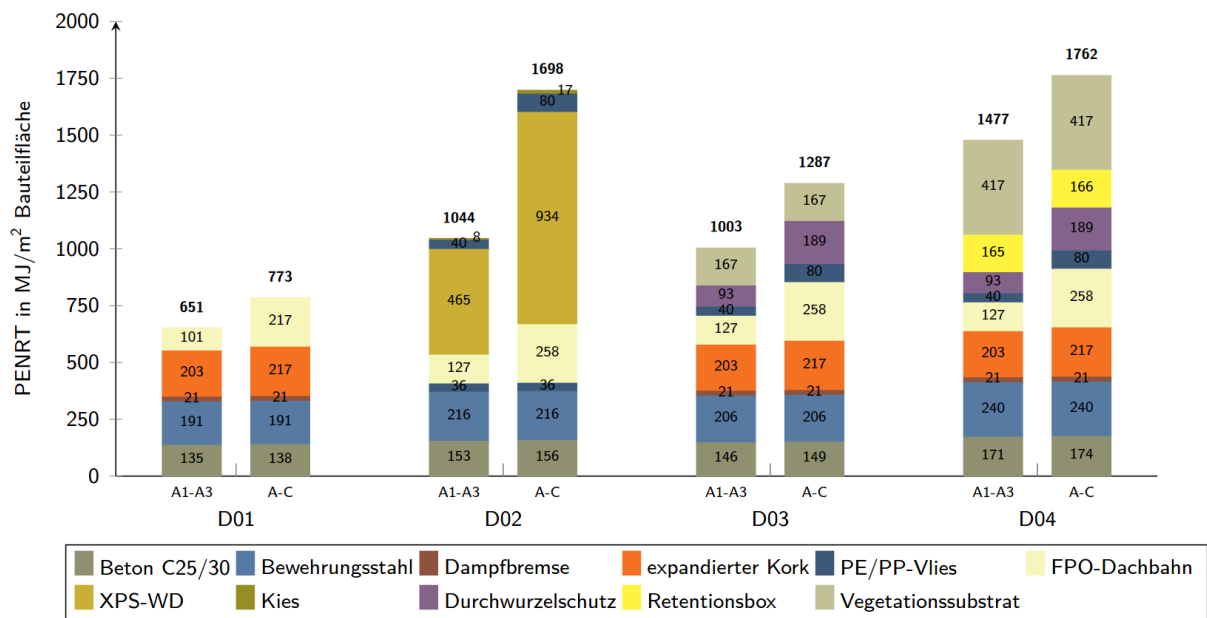


Abbildung 80: PENRT Dach in MJ/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

Bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus weist die Variante D02 beim Treibhauspotential die höchsten Werte auf. Dies liegt zu großen Teilen an der XPS-Dämmung, die zusätzlich einmal innerhalb des Betrachtungszeitraums erneuert werden muss. Bei den Varianten D03 und D04 erzielt in der Herstellungsphase nicht nur der expandierte Kork, sondern auch das Vegetationssubstrat CO<sub>2</sub>-Gutschriften. Zwar liegen für das Vegetationssubstrat in der ÖKOBAUDAT keine Werte für die Lebenszyklusphase C vor. Allerdings wird davon ausgegangen, dass die Entsorgung des Vegetationssubstrats einen vernachlässigbaren Beitrag zum Bilanzierungsergebnis liefert, da das Substrat im Normalfall ohne großen Aufwand wiederverwendet werden kann.

Für den fossilen Primärenergiegehalt zeigt sich erneut der hohe Einfluss der XPS-Dämmung bei der Variante D02, der zu ungefähr 60 % des gesamten fossilen Primärenergiebedarfs beiträgt. Ebenso wird deutlich, dass der fossile Primärenergiebedarf für das Substrat einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Ökobilanz hat. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass der verwendete Datensatz für das Vegetationssubstrat von einem relativ großen Anteil an Ziegelsplitt ausgeht. Die hohen Temperaturen, die zum Brennen von Ziegeln benötigt werden, machen einen Einsatz von fossilen Primärenergieträgern noch nötig und beeinflussen die Bilanz nachteilig.

Weiterhin zeigt sich deutlich, dass durch die erhöhte Auflast bei der Variante D04 auch ein massiveres Tragwerk erforderlich ist. Für die Variante D04 ist die Dicke der tragenden Betondecke mit 19 cm am größten. Für das Treibhauspotential ist dementsprechend die Einwirkung des Stahlbetons um ungefähr 25 % größer als für die Variante 1. Die Unterschiede zwischen den Varianten D01, D02 und D03 sind für das Treibhauspotential geringfügig. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass für die Variante D01 zwar eine geringere Bauteilhöhe erforderlich ist, der Bewehrungsanteil im Bauwerk aber höher ist. Wie bereits erwähnt, sind hier auch andere Konstruktionen mit einem größeren Bauteilaufbau und einem dementsprechend geringeren Bewehrungsanteil möglich. Für den fossilen Primärenergiebedarf zeigt sich ein ähnliches Bild. Auch hier ist der Wert der Variante D04 um 25 % größer als bei der Variante D01.

Neben Kork als Dämmmaterial können weitere Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen verwendet werden. Im Rahmen des Projekts wurde beispielhaft die Verwendung von Holzfaserdämmplatten untersucht. Durch den verbesserten U-Wert von Holzfaserdämmplatten gegenüber expandiertem Kork verringert sich die erforderliche Dämmstärke. Betrachtet man die Umweltwirkungen im Treibhauspotential zeigt sich jedoch, dass die Holzfaserdämmplatte im Vergleich zu Kork höhere Werte bei Betrachtung des vollständigen Lebenszyklus aufweist (s. Abbildung 81). Auch bei dem nicht-erneuerbaren Primärenergiegehalt sind die Werte der Holzfaserdämmplatte größer als die des expandierten Korks. Allerdings können hier bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus Gutschriften erzielt werden, da die Holzfaserdämmplatte als Energieträger verwendet werden kann (s. Abbildung 82).

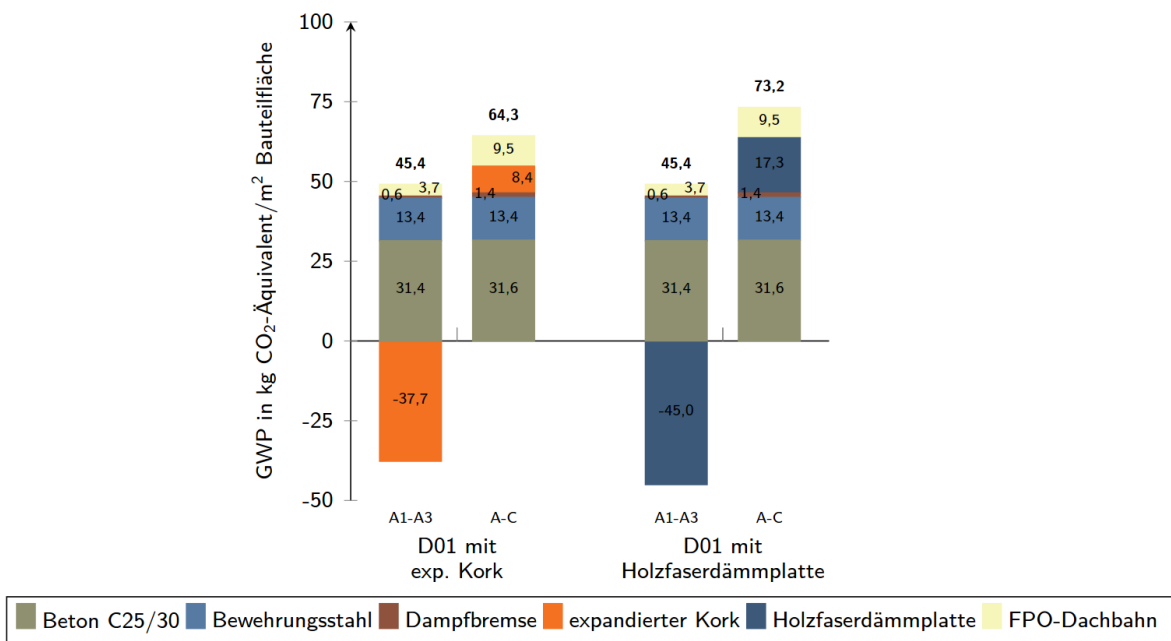


Abbildung 81: GWP Variante D01 in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

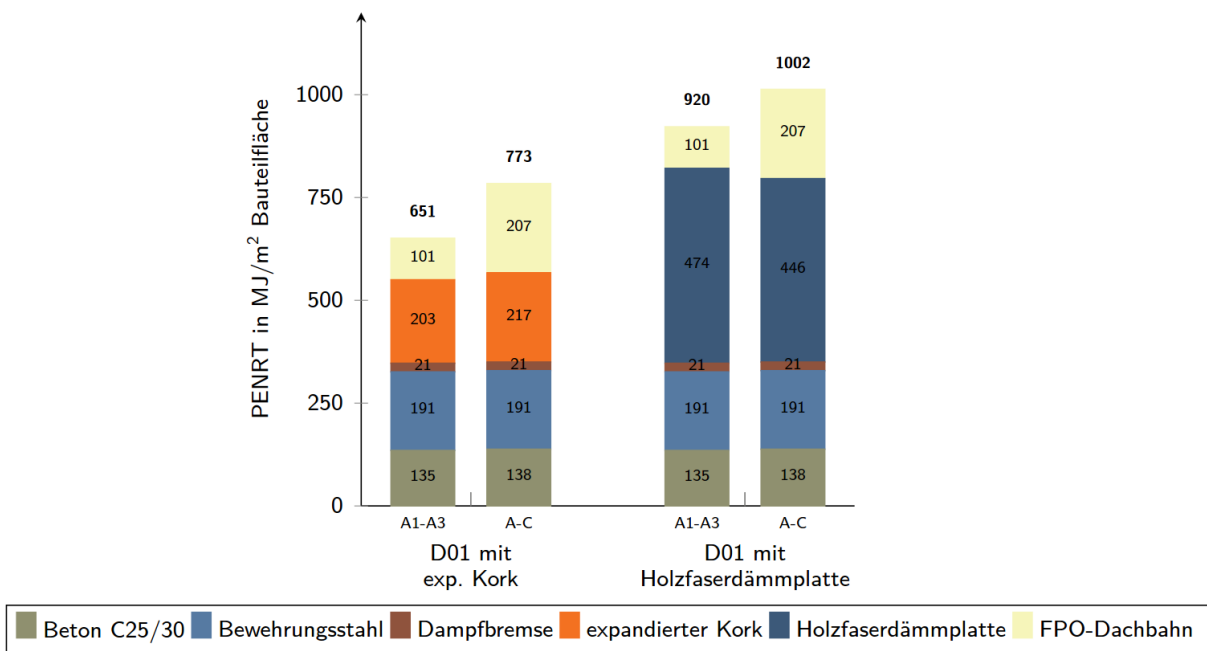


Abbildung 82: PENRT Variante D01 in MJ/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

### Rückbaubarkeit

Für die Untersuchung des Recyclingpotentials der Dachvarianten wird die Stahlbetonunterkonstruktion nicht betrachtet. Die für das Dach ermittelten Recyclingfaktoren können der Tabelle 49 entnommen werden. Es zeigt sich jedoch, dass der Recyclingfaktor für das Dach nur eine bedingte Aussagekraft über das tatsächliche Rückbau- und Entsorgungspotential der einzelnen Varianten hat. Die Variante D04 weist hier den höchsten Recyclingfaktor auf. Dies ist aber insbesondere deswegen nicht plausibel, weil die Variante D04 auf demselben Bauteilaufbau wie die Variante D01 basiert, welche allerdings den niedrigsten Wert aller untersuchten Varianten erzielt.



Der hohe Recyclingfaktor der Varianten D02, D03 und D04 ist zu großen Teilen auf die Kiesschicht respektive die Substratschicht zurückzuführen. Diese nehmen einen großen Anteil an der Gesamtmasse ein und erreichen zudem noch in den Bereichen Sortenreinheit und Entsorgung sehr hohe Punktzahlen. Werden die Kies- und Substratschichten vernachlässigt, reduzieren sich die Recyclingfaktoren aller drei Varianten D02, D03 und D04 auf  $R = 60,00$ . Das Berechnungssystem weist hier im Hinblick auf die Materialeinsparung einen Schwachpunkt auf, da es sich auf den Recyclingfaktor positiv auswirkt, eine leicht rückbaubare große Masse zu verwenden. Somit ist keine Vergleichbarkeit der einzelnen Konstruktionsvarianten gegeben. Bei der Betrachtung der Rückbaubarkeit wird an dieser Stelle eine Bewertung der Varianten außerhalb des BNB-Kriteriums durchgeführt.

Tabelle 49: Recyclingfaktoren der unterschiedlichen Dachvarianten.

Variante	Recyclingfaktor
D01 – Warmdach mit freiliegender Abdichtung	60,00
D02 – Umkehrdach mit Kiesschicht	86,92
D03 – Extensiv begrüntes Dach	81,72
D04 – Intensiv begrüntes Retentionsdach mit Drossel	85,43

Aus Sicht der Rückbaubarkeit und des Recyclings wird die Variante D01 als am positivsten eingeschätzt. Die mechanisch gefügten Bauteilebenen können ohne größeren Aufwand wieder getrennt werden und die Materialien in die entsprechenden Materialkreisläufe rückgeführt werden. Zusätzlich kann die tragende Stahlbetondecke dünner ausgeführt werden. Dadurch reduziert sich die Menge an benötigtem Material. An zweiter Stelle der Rangfolge wird die Variante D03 gesetzt. Der Aufwand zum Rückbau und zur Trennung der einzelnen Schichten vergrößert sich im Vergleich zur Variante D01 durch die Substratschicht etwas. Der Vergleich der Varianten D02 und D04 ist nicht ohne weiteres möglich. Sowohl bei der Variante D02 als auch bei der Variante D04 kann die Deckschicht leicht abgetragen werden. Bei der Variante D04 ist die Masse der obersten Schicht noch größer als bei der Variante D02. Die Dämmung der Variante D02 besteht hingegen aus XPS, was sich in einer niedrigen Punktzahl bei der Entsorgung äußert. Für die Variante D04 muss allerdings eine deutlich dickere tragende Stahlbetondecke vorgesehen werden. Da bei der Berechnung des Recyclingfaktors die Punktzahl für die Entsorgung stärker gewichtet wird, wird an dieser Stelle die schlechte Rückführung in den Stoffkreislauf der XPS-Dämmung stärker gewichtet. In der Rangfolge wird die Variante D04 an dritter Stelle und die Variante D02 an vierter Stelle eingeordnet.

#### Mikroklima, Biodiversität, Feinstaubbindung

Durch die Farbwahl der freiliegenden Abdichtungsbahn bei der Variante D01 oder die Farbwahl des Kieses und der Korngrößen bei der Variante D02 lassen sich Klimapotentiale erschließen (vergleiche hierzu Kapitel 7.3.4). Auf die Auswirkungen einer Flachdachbegrünung auf das Mikroklima (vergleiche Kapitel 7.3.4.) Welche Pflanzen im Idealfall für die Dachbegrünung eingesetzt werden sollten, um eine Erhöhung der Biodiversität oder der Feinstaubbindung zu erreichen, wird in Kapitel 8.5.2 näher erläutert.

#### **7.4.5. Außenanlage**

Eine vorausschauende Gestaltung der Außenanlagen ist für einen effektiven Schutz des Gebäudes bei Starkregenfällen unerlässlich. Insbesondere die Modellierung des Geländes ist wichtig, um im Starkregenfall Wassereintritt ins Gebäude zu vermeiden. Dabei sollte darauf geachtet werden, Geländeneigungen vom Gebäude abfallend zu planen. Weiterhin kann durch die Planung von Versickerungsmöglichkeiten oder Retentionsflächen Volumen geschaffen werden, in welches das anfallende Regenwasser geleitet werden kann, ohne dass es Schaden an der Gebäudestruktur anrichtet oder ins Gebäude eindringt. Auf die Regenwasserretention wurde bereits in Kapitel 4.3 einleitend eingegangen.

Möglich sind beispielsweise Sickermulden, in denen sich das Wasser temporär anstauen kann und langsam im Grundwasser versickert. Als weiterführende Möglichkeit sind Rigolenversickerungen möglich. Rigolen sind unterirdische Gräben, die mit Kies gefüllt werden. Über die Kiesschicht versickert das anstehende Wasser im Erreich. Denkbar ist auch die Kombination zwischen Rigolen und Sickermulden über eine Mulden-Rigolen-Versickerung. Zusätzlich besteht bei Rigolen die Möglichkeit, das Wasser in Zisternen oder Tanks zu speichern und für die Bewässerung oder als separaten Wasserkreislauf beispielsweise als Toilettenspülung zu nutzen. Rigolen werden dabei Zisternen nachgeschaltet. Das überschüssige Wasser, das nicht mehr in der Zisterne gespeichert werden kann, wird an die Rigole weitergegeben und versickert im Boden. Darüber hinaus ist es möglich, Verkehrsflächen temporär zur Wasserspeicherung zu nutzen. Das anfallende Niederschlagswasser kann dann gezielt in diese Flächen geleitet und zeitlich verzögert ans Kanalnetz abgegeben werden. Hier bieten sich beispielsweise Verkehrsflächen wie Hofzufahrten an, sofern alternative Zugänge zum Gebäude bestehen. Ebenso ist es wichtig, dass die Verkehrsflächen mit einem geeigneten Entwässerungssystem zu versehen, um eine rasche normale Nutzung zu ermöglichen. Die Hofzufahrten können beispielsweise mit Mauern eingefasst werden. In der Abbildung 83 sind Möglichkeiten zur Regenwasserrückhaltung auf dem Grundstück skizziert. Auf der linken Seite der Musterliegenschaft ist eine mögliche Speicherung in Zisternen mit einer Weiterleitung an eine Rigolenversickerung vorgesehen, während auf der rechten Seite die temporäre Rückhaltung auf Verkehrsflächen am Beispiel eines Weges aufgezeigt ist. Weiterführende Informationsmöglichkeiten zur Gestaltung der Außenanlagen finden sich in BBSR (2018a), BBSR (2018b) und Goderbauer-Marchner/Sontheimer (2015).

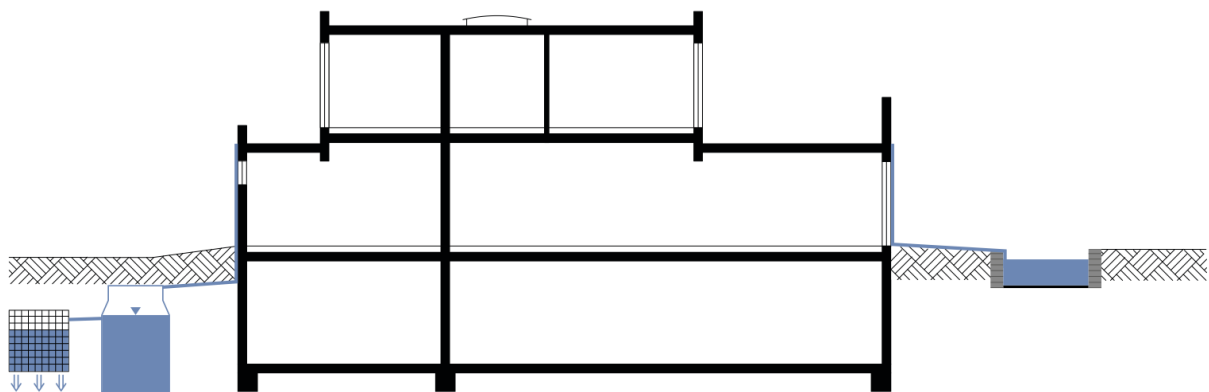


Abbildung 83: Möglichkeiten der Regenwasserrückhaltung auf dem Gelände

## 7.5. Hochwasser

### 7.5.1. Grundsätzlicher Umgang mit der Einwirkung

Da die Einwirkung Hochwasser nicht das ganze Gebäude betrifft, werden in diesem Kapitel die Aspekte Keller, Fußboden, Außenwände und Technische Gebäudeausrüstung betrachtet. Nähere Ausführungen zur Gefährdung durch Hochwasser finden sich auch im Erläuterungsbericht zum Kriteriensteckbrief für das BNB-Kriterium 4.1.5. „Widerstandsfähigkeit gegen Naturgefahren“ (Hatzfeld/Kurz 2010), in DWA (2016), der Hochwasserschutzfibel (BMI 2018a), in Patt/Jüpner (2013) sowie in Striffler/Heiland (2015). Grundsätzlich unterscheidet man bei der hochwassergerechten Planung zwischen den folgenden Strategien, die in der Abbildung 84 skizziert sind:

- Ausweichen,
- Anpassen,
- Widerstehen.

Die Strategie „Ausweichen“ verfolgt das Ziel, hochwassersensible Nutzungen außerhalb der Gefahrenzone anzusiedeln. Die konsequenteste Umsetzung der Strategie „Ausweichen“ ist es, in einem Gebiet mit potentieller Hochwassergefährdung überhaupt nicht zu bauen. Da sich das Projekt KLIBAU mit Neubauten befasst, steht diese Wahlmöglichkeit im Gegensatz zu Bestandssanierungen noch zur Verfügung. Fällt die Entscheidung allerdings für einen Neubau in einem potentiell hochwassergefährdeten Gebiet, dann kann beispielsweise auf eine Unterkellerung verzichtet, das Gebäude aufgestellt oder hochwertige Nutzungen und Technologien in die oberen Stockwerke verlagert werden. In vielen traditionellen Gebäuden diente der Keller neben der Lagerung von Lebensmitteln, Kohle oder Flaschen und Fässern als Pufferzone, um das Hauptgebäude gegen Hochwasser aber auch aufsteigende Erdfeuchte trocken zu halten. In der heutigen Zeit verliert die Nutzung des Kellers als Lagerstätte jedoch immer mehr an Bedeutung und wandelt sich hin zu einem hochwertigen Ausbau als Aufenthaltsraum oder Arbeitsstätte. Ebenso verliert der Keller aufgrund der technischen Entwicklung hochwertiger Abdichtungstechnologien der Bodenplatte seine Bedeutung als Pufferzone (Striffler/Heiland 2015). Für heutige Bauvorhaben bedeutet das, dass ein Keller nicht zwingend notwendig ist. Zwar sind die Vorteile eines Kellers auch aus heutiger Sicht gegeben, allerdings kann der finanzielle, zeitliche und ökonomische Aufwand zur Errichtung eines hochwasserresistenten Kellers in hochwassergefährdeten Gebieten den Nutzen schnell überschreiten. Hochwertige Technologien, die typischerweise im Keller platziert werden und in hochwassergefährdeten Bereichen besser in den Obergeschossen oder auf dem Dach positioniert werden, sind allesamt i.d.R. Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung. Dazu zählen beispielsweise Wärmeerzeuger, zentrale Wohnungslüftungsanlagen oder die Elektroverteilung.



Abbildung 84: Strategien im Umgang mit der Einwirkung Hochwasser, in Anlehnung an BMI (2018a)

Die Strategie „Anpassen“ strebt ein „Leben mit dem Wasser“ an, sodass im Hochwasserfall nur geringe Schäden zu erwarten sind (BMI 2018a). Das Wasser darf im Hochwasserfall in das Gebäude eindringen, die Bauteile werden allerdings so ausgebildet, dass das Wasser keinen wesentlichen Schaden verursacht. Nach dem Abfluss bzw. dem Abpumpen des Wassers, müssen prinzipiell intensive Trocknungsmaßnahmen vorgenommen werden, um Schimmel oder Langzeitschäden an den Bauteilen zu vermeiden. Existiert ein Kellergeschoss, dann sollte unbedingt ein Pumpensumpf vorgesehen werden, um ein vollständiges Abpumpen des Wassers zu ermöglichen. Bei der Strategie „Anpassen“ sind die Materialwahl und die Schichtenfolge von entscheidender Bedeutung, um Schäden durch die Wassereinwirkung am Bauteil zu vermeiden, eine einfache Bauteiltrocknung zu ermöglichen oder einzelne vulnerable Schichten einfach ausbauen und ersetzen zu können.

Eine wichtige Kennzahl der Materialien ist die kapillare Saugfähigkeit, die sich im Wasseraufnahmekoeffizient  $A$  abbildet. Der Koeffizient beschreibt die Wassermasse, die ein im Wasser gelagerter Baustoff pro Flächeneinheit und Stunde in sein Gefüge aufnimmt und gibt Aufschluss über die Durchlässigkeit (Krus 1995; Häupl et al. 2017). Um beurteilen zu können, inwiefern ein Baustoff gegenüber der Einwirkung Hochwasser resistent ist, müssen nach DWA (2016: 62) zudem folgende Kriterien untersucht werden:

- Beständigkeit der Baustoffe im Hinblick auf ihre Festigkeitseigenschaft,
- Form- und Volumenbeständigkeit nach einer Hochwassereinwirkung,
- Widerstandsfähigkeit gegenüber pflanzlichem oder tierischem Schädlingsbefall infolge langfristiger hoher Durchfeuchtung,
- Widerstandsfähigkeit gegenüber Frostschäden oder Korrosionserscheinungen als flutbedingte sekundäre Schadensmechanismen,
- Eignung zur natürlichen oder technischen Bautrocknung vor Ort einschließlich der erforderlichen Trocknungsdauer,
- Widerstand gegen Kontaminationen im Flutwasser.

Um für den Hochwasserfall geeignete Materialien zu verwenden, wird in einem ersten Schritt zwischen den einzelnen Funktionen der Ebenen des Bauteilaufbaus unterschieden. Diese sind die Dämmebene, die tragende Ebene sowie die Schutzebene. Die Verlagerung von Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung in höher liegende Bereiche des Gebäudes ist ebenso ein wichtiger Punkt dieser Strategie.

Bei der Strategie „Widerstehen“ wird das Eindringen des Wassers in das Gebäude verhindert (DWA 2016: 21 f.). Dies kann entweder durch eine wasserdichte Ausbildung der Außenbauteile in Verbindung mit den Gebäudeöffnungen erfolgen oder durch mobile Hochwasserschutzsysteme um das Gebäude herum. Im ersten Fall ist ein besonderes Augenmerk auf Wanddurchführungen, Gebäudeöffnungen wie Fenster und Türen sowie die Rückstausicherung zum Kanalisationssystem zu legen. Zur Umsetzung der Strategie und um einen effektiven Hochwasserschutz zu gewährleisten, ist ein ganzheitliches Abdichtungskonzept erforderlich. Selbst bei einer fachgerechten Herstellung einer Schwarzen, Weißen oder Braunen Wanne zur Abdichtung des Kellers, bestehen zahlreiche zusätzliche Schwachstellen, die ein potenzielles Risiko für Wassereintritt in das Gebäude darstellen. Diese sind in der Abbildung 85 dargestellt und sollen im Folgenden erläutert werden. Steigt der Hochwasserpegel über die Rückstauenebene der Kanalisation an, kann dies zu einer Umkehr der Fließrichtung führen (2). Dieser Effekt kann durch eine Rückstausicherung in Form eines Absperrschiebers oder einer Rückschlagklappe verhindert werden. Eine weitere potentielle Gefährdung stellen Wanddurchführungen dar (3). Zur Sicherung gegen drückendes Grundwasser kann eine druckwasserfeste Wanddurchführung verwendet werden (BMI 2018a). Um den Schutz gegen eindringendes Grundwasser auch nach Umbau- oder Anpassungsmaßnahmen aufrechtzuerhalten, ist eine sorgfältige Dokumentation der Bauweise erforderlich.

Ohne ein Bereitstellen dieses Wissens in bspw. einer Dokumentation für zukünftige Arbeiten an diesem Bauteil besteht die Gefahr, dass bei nachträglich installierten Wanddurchführungen die Anforderungen an die Abdichtung missachtet werden.

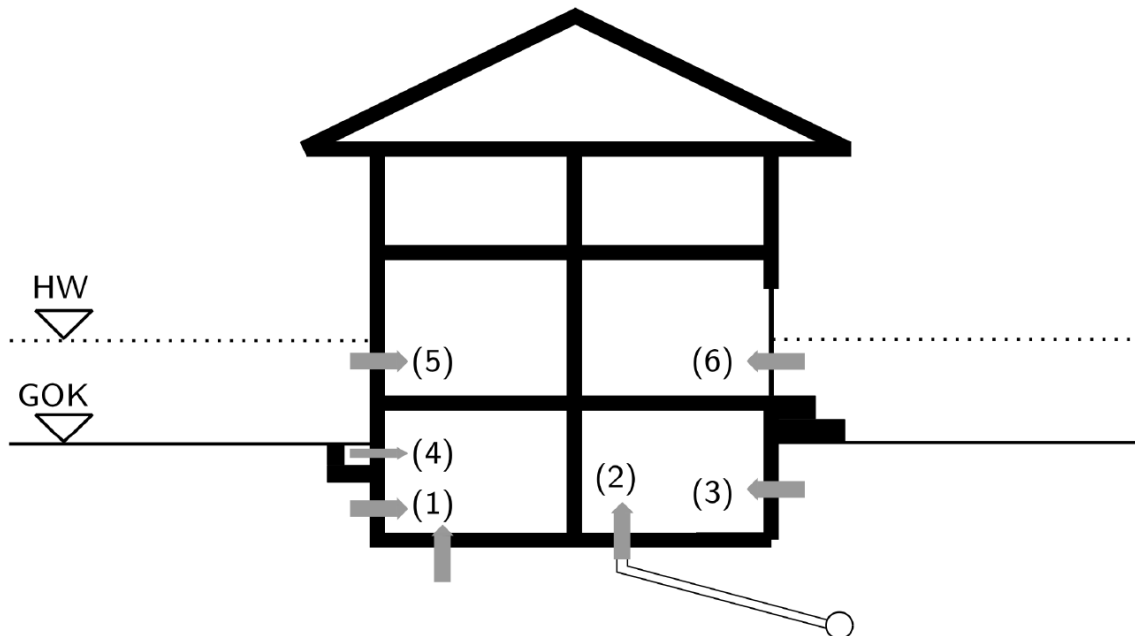


Abbildung 85: Eintrittsmöglichkeiten von Wasser in das Gebäude nach BMI (2018)

- (1) Eindringen durch Bodenplatte oder Kellerwände
- (2) Eindringen von Rückstauwasser durch die Kanalisation
- (3) Wanddurchführungen
- (4) Eindringen über Lichtschächte oder Kellerfenster
- (5) Eindringen durch Außenwand
- (6) Eindringen durch Türen und Fenster

Weiterhin muss in der Planung ebenso der Schutz gegen eindringendes Oberflächenwasser über Lichtschächte berücksichtigt werden (4). Über Aufkantungen von mindestens 15 cm sowie Überdachungen der Lichtschächte kann auf der einen Seite verhindert werden, dass Oberflächenwasser oder Niederschlag in den Lichtschacht eintritt (Jolk/Peters/Willen 2017). Auf der anderen Seite wird durch Abflusseinrichtungen im Boden des Lichtschachts die Gefahr verringert, dass eindringendes Wasser direkt über die Kellerfenster in den Keller gelangt. Auch die Fenster im Lichtschacht sollten nicht bis zur Sohle des Lichtschachts reichen. Weitere kritische Stellen im Erdgeschoss sind Türen und Fenster. Die Untergeschosse können noch so gut abgedichtet werden, wenn das Wasser im Hochwasserfall über Türen oder Fenster im Erdgeschoss in das Gebäude eindringt und in den Keller fließt (6). Der Schutz vor eindringendem Wasser kann durch eine Erhöhung des Hauseingangs über eine kurze Treppe oder barrierefrei über eine Rampe sowie über mobile Dammbalkensysteme erfolgen. Kellerfenster und -türen sowie ebenerdigen Gebäudeöffnungen sollten mit wasserdichten Konstruktionen ausgeführt werden (DWA 2016). Das Wasser kann auch über kapillaren Feuchtetransport sowie Risse, Fugen oder Undichtigkeiten durch die Kellerwand oder die Bodenplatte (1) sowie die Außenwand (5) in das Gebäude eindringen.

## 7.5.2. Standortwahl

Der Standort zur Ermittlung konkreter Hochwasserstände wurde wie in Kapitel 7.4.1 beschrieben festgelegt. Aus den Hochwassergefährdungskarten für Baden-Württemberg (LUBW 2019) wurden die entsprechenden Hochwasserstände, die zur Ermittlung der drei Expositionsklassen erforderlich sind ermittelt:

- $HW_{100}$ : 0,20 m
- $HW_{Extrem}$ : 0,60 m

Anhand dieser Hochwasserstände ergeben sich die in Tabelle 50 dargestellten Wasserstandshöhen für die Expositionsklassen.

Tabelle 50: Ermittelte Wasserstandshöhen für den Untersuchungsstandort

Expositionsklasse	Wasserstandshöhe in m
1	0,24
2	0,60
3	0,72

Durch den Klimaänderungsfaktor verändert sich die Wasserstandshöhe bei einem 100jährigen Ereignis am betrachteten Standort nur um 4 cm, bei einem Extremereignis um 12 cm. Allerdings verdeutlicht auch die geringe Änderung die Gefahr bei der Strategie „Widerstehen“. Werden Hochwasserschutzsysteme auf eine bestimmte Wasserstandshöhe ausgelegt, dann bedeutet bereits eine geringfügige Überschreitung dieser Wasserstandshöhe, dass die Schutzsysteme versagen. Dadurch kann das Wasser in das Gebäude eindringen kann und es entsteht derselbe Schaden, als ob kein Schutzsystem vorhanden wäre. Für die Strategie „Anpassen“ hat eine Änderung der Wasserstandshöhe keine große Bedeutung.

## 7.5.3. Klimaanpassungskonzept für die Einwirkung Hochwasser

Das hier gewählte Anpassungskonzept an die Einwirkung Hochwasser sieht vor, dass für die Expositionsklasse 1 – also dem 100jährigen Hochwasserereignis mit Berücksichtigung des Klimaänderungsfaktors – die Strategie „Widerstehen“ verwendet wird. Hierfür werden wasserundurchlässige Erhöhungen im Erdgeschoss vorgesehen, die das Eindringen des Hochwassers verhindern. Sämtliche Eingangstüren oder Terrassentüren müssen dementsprechend erhöht ausgeführt werden. Die Oberkante der wasserundurchlässigen Erhöhungen sollte 15 cm über den gewählten Bemessungswasserstand nach oben geführt werden (Lohmeyer/Ebeling 2018). Das bedeutet im konkreten Fall bis zu einer Höhe von 0,39 m (s. Abbildung 86).

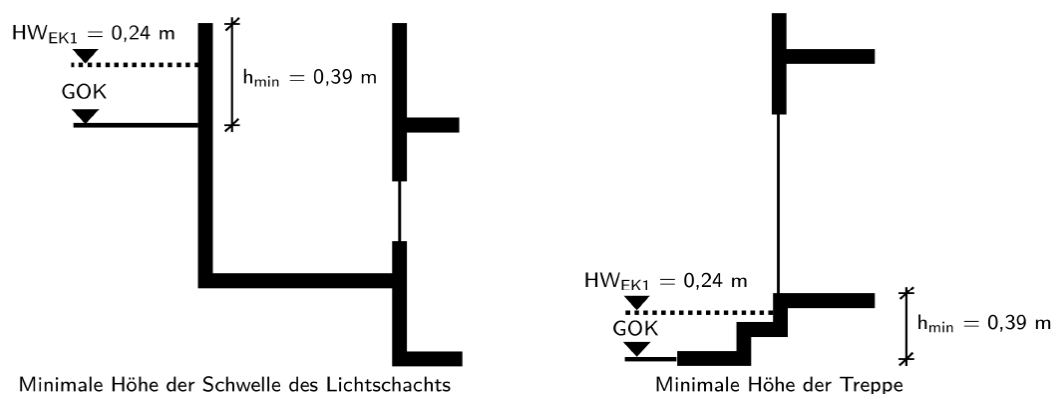


Abbildung 86: Höhe der wasserundurchlässig ausgebildeten Bauteile über Geländeoberkante

Anstelle der Erhöhung von Eingangs- und Terrassentüren können diese alternativ auch mit mobilen Dammbalkensystemen ausgestattet werden. Die Dammbalken können im Hochwasserfall in vorgefertigte Führungsschienen eingebaut werden und verhindern den Wassereintritt durch Gebäudeöffnungen bis zu einer festgelegten Höhe. Für die Expositionsclassen 2 und 3 wird ein Eindringen des Hochwassers in das Gebäude zugelassen und die Strategie „Anpassen“ gewählt. Dementsprechend werden im Folgenden Fußboden und Außenwandkonstruktionen erarbeitet, die entweder unempfindlich gegen die Einwirkung Hochwasser sind oder die einfach rückbaubar und instand zu setzen sind.

#### 7.5.4. Keller

Der Untersuchungsstandort befindet sich in einem hochwassergefährdeten Gebiet (vgl. Kapitel 7.4.1). Durch die Flussnähe ist davon auszugehen, dass der Standort bereits einem hohen Grundwasserspiegel sowie der Gefahr von Hochwasser ausgesetzt ist, was ein sorgfältiges Abdichtungskonzept des Kellers erforderlich macht. Nach Kapitel 7.5.3 wird für die Musterliegenschaft eine Kombination der Strategien „Anpassen“ und „Widerstehen“ verfolgt. Dies bedeutet, dass ein Wassereintritt über die Kellerwände und die Bodenplatte durch konstruktive Maßnahmen verhindert wird („Widerstehen“). Ein Wassereintritt über Öffnungen im Erdgeschoss ist allerdings nicht ausgeschlossen („Anpassen“). Für die Strategie „Widerstehen“ ergibt sich für den gewählten Standort keine erhöhte Gefährdungslage aufgrund des Klimawandels im Hinblick auf die Einwirkungen Starkregen und Hochwasser. Schon beim Auftreten eines HQ<sub>100</sub> ohne Berücksichtigung der Klimaänderung müssen die Kellerwände bis zur Geländeoberkante und die Gebäudesohle wasserundurchlässig ausgeführt werden, um ein Eindringen von anstehendem Grundwasser zu verhindern. Für die Strategie „Anpassen“ muss berücksichtigt werden, dass durch den Klimawandel höhere Wasserstände erwartet werden. Somit muss das Gebäude bis zu einer größeren Höhe hochwasserangepasst ausgeführt werden.

Für die tragende Ebene der Außenwände ist die Verwendung von Materialien mit einer geringen Wasseraufnahmekapazität zu empfehlen. Stahlbeton ist hier im Vergleich zu den meisten Mauerwerksvarianten zu bevorzugen, da er eine geringere Wasseraufnahmekapazität besitzt. Gerade offenporige Mauersteine sind aufgrund ihrer Wasseraufnahmekapazität genauso ungeeignet wie beispielsweise gebrannte Hochlochziegel. Die bauphysikalischen Vorteile im Hinblick auf den Wärmeschutz werden durch die hohe kapillare Saugfähigkeit sowie die Möglichkeit der Einlagerung von Flutwasser in den Hochlöchern reduziert.

Die Ausführungsvariante „Schwarze Wanne“ könnte allerdings beispielsweise mit einem Kalksandsteinmauerwerk ausgeführt werden. Die gesonderte Abdichtungsschicht aus Bitumen verhindert das Eindringen von Wasser in das Mauerwerk über kapillare Strömung oder durch Fugen. Bei einer Braunen oder einer Weißen Wanne muss jedoch Stahlbeton verwendet werden, da durch die erhöhte kapillare Wasseraufnahme von Kalksandstein Wasser über das Bauteil ins Gebäude eindringen kann. Bei der Auswahl der Dämmstoffe für die Perimeterdämmung eignen sich wasserabweisende Dämmstoffe wie beispielsweise extrudierter Polystyrolschaum (XPS) oder Schaumglas. Beide Materialien zeichnen sich durch eine hohe Druckfestigkeit sowie eine äußerst hohe Widerstandsfähigkeit gegen Wassereintritt aus. Durch die hermetisch abgeschlossene Zellstruktur des geschäumten Glaspulvers kann kein Wasser in die Dämmstoffplatten eindringen und die Struktur der Platte zerstören. Nicht geeignet für die Dämmung sind Faserdämmstoffe jeglicher Art, da sie durch die hohe Porosität eine sehr hohe Wasseraufnahmekapazität haben und durch das eindringende Wasser ihre Form und ihre Funktion verlieren (Patt/Jüpner 2013).

Da der Keller aufgrund des zulässigen Wassereintritts nicht hochwertig genutzt werden sollte, kann auf eine Wärmedämmung des Kellers verzichtet und die thermische Hülle entlang der Kellerdecke geführt werden. Dabei besteht allerdings eine erhöhte Gefährdung durch Wärmebrücken. Zur Verringerung der Wärmebrückengefahr ist auch eine Ausführung des Kellers mit einer Perimeterdämmung möglich. Im weiteren Verlauf werden sowohl die gedämmte Variante als auch die ungedämmte Variante untersucht.

Ein Eindringen von Wasser in den Keller findet nicht nur über undichte flächige Bauteile statt, sondern kann wie bereits in 7.4.5 erwähnt, auch über Wandöffnungen, Rohrdurchdringungen oder Lichtschächte in das Gebäude gelangen. Für die Expositionsklasse 1 und einen Bemessungswasserstand von 0,24 m (s. Tabelle 50) über der Geländeoberkante können die Lichtschächte und Türen durch entsprechende Maßnahmen wie Schwellen gegen Hochwasser gesichert werden (s. Abbildung 86). Eine gleichzeitige Abdeckung der Lichtschächte stellt den Schutz vor Starkregenereignissen sicher. Für die Expositionsklasse 2 und 3 hingegen müssten Lichtschächte und Kellertreppen mit nahezu 1 m hohen, wasserundurchlässig ausgeführten Erhöhungen gesichert werden, da die Oberkante der Konstruktion 15 cm über dem Bemessungswasserstand von 0,60 bzw. 0,72 m (Tabelle 50) liegen sollte (Lohmeyer/Ebeling 2018). Im Hinblick auf den hohen materiellen Aufwand und die geplante niederwertige Nutzung des Kellers erscheint diese Maßnahme im Hinblick auf die Ressourceneffizienz und die Graue Energie nicht geeignet. Tritt der Hochwasserstand der Expositionsklassen 2 und 3 ein, kann eine Überflutung des Kellers zugelassen werden. Durch die relativ lange Vorwarnzeit bei Hochwassern bleibt ausreichend Zeit, um gelagerte Gegenstände in ungefährdete Bereiche zu transportieren. Neben den schon genannten Strategien muss im Hinblick auf den Keller die Standfestigkeit des Gebäudes betrachtet werden. Steigt der äußere Wasserpegel über die Höhe der Bodenplatte an, verstärkt sich die Auftriebskraft auf die Bodenplatte. Im schlimmsten Fall kann dies zum Aufschwimmen des Gebäudes und zu einer Gefährdung der Standsicherheit führen.

Um die Standsicherheit zu gewährleisten, muss die Auflast des Gebäudes größer als die Auftriebskraft aus dem verdrängten Volumen sein. Kann die geforderte Auflast des Gebäudes nicht durch ständige Lasten aus der Tragstruktur erreicht werden, stellt ein gezieltes Fluten des Kellers die Standsicherheit sicher. Im Hinblick auf eine Reduktion des entstehenden Schadens, sollte die nötige Fluthöhe im Vorfeld erfasst und entsprechende Präventionsmaßnahmen im Keller ergriffen werden. Ebenso ist es ratsam, sauberes Wasser für die Flutung zu verwenden, da ansonsten die Gefahr der Verunreinigung des Kellers mit im Flutwasser enthaltenen Schadstoffen besteht (DWA 2016). Durch die Unterströmung von Fundamenten bei Hochwasser und die daraus resultierende Erosion können Bauteile zerstört oder beschädigt werden. Bei erosionsgefährdeten Böden sollte zur Gewährleistung der Standsicherheit des Gebäudes die Fundamentunterkante mindestens 1 m unter der zu erwartenden Erosionssohle liegen (BMI 2018a).

Die Erschließung von positiven Klima- und Umweltpotentialen ist bei der Bauteilgruppe Keller nur in geringem Umfang möglich. Umweltpotentiale wie die Steigerung der Biodiversität oder Regenwasserrückhaltung sind nicht relevant oder entwickeln sich durch den baulichen Eingriff in den Boden eher nachteilig. Von Bedeutung ist jedoch das emittierte Volumen an Treibhausgasen, die über die ökobilanzielle Betrachtung Eingang in die Bewertung der Bauteile finden. Als weiteres Klima- und Umweltpotential wird die Rückbaubarkeit der Bauteile betrachtet. Da eine minderwertige Nutzung des Kellers als Lagerstätte angestrebt wird, muss der Keller nicht zwingend als beheizter Raum betrachtet werden. Zum Vergleich der Varianten „ungedämmt“ und „gedämmt“ wird jedoch für die gedämmte Ausführung ein U-Wert von 0,17 W/(m<sup>2</sup> K) angesetzt. Im Folgenden werden die für den Keller erarbeiteten Lösungsvorschläge

- K01 - Schwarze Wanne,
- K02 - Braune Wanne und
- K03 - Weiße Wanne

vorgestellt. Für die Bodenplatte wird das jeweilige Bauteil bis zur obersten Kante der tragenden Ebene aus Stahlbeton betrachtet. Der darüber liegende Fußbodenaufbau wird in Kapitel 7.5.5 genauer untersucht.



## K01 – Schwarze Wanne

Bei der Schwarzen Wanne erfolgt die Abdichtung über eine außenseitig aufgetragene Dichtungsbahn aus Kunststoff oder Bitumen gegen den Lastfall „drückendes Wasser von außen“. Durch die Trennung der Abdichtungsebene von der tragenden Ebene ist es im Unterschied zur Weißen Wanne nicht notwendig, die Außenwände aus Stahlbeton zu fertigen. Auch Wände aus Mauerwerk sind eine mögliche Alternative. Die Bemessung der Schwarzen Wanne erfolgt nach DIN 18533-2:2017-07. Die Variante K01 hat im allgemeinen Fall eine hohe Dichtigkeit. Gefahr besteht allerdings bei der Leitungsdurchdringung und bei Übergängen von Bauteilen. Weiterhin ist ein nachträgliches Abdichten von Undichtigkeiten aufgrund der Unzugänglichkeit der Dichtungsbahn sehr schwer bis nicht möglich. Im Unterschied zur Weißen oder zur Braunen Wanne können Undichtigkeiten nur mit sehr hohem Aufwand lokalisiert werden. Daher muss die Abdichtungsbahn vor Beschädigung mit einer Noppenfolie oder einer gleichwertigen Schutzschicht versehen werden, um die Unversehrtheit der Abdichtung und damit die Funktionsfähigkeit dauerhaft zu gewährleisten (DWA 2016).

Tabelle 51: Wassereinwirkungsklassen für erdberührte Bauteile (DIN 18533-1:2017-07)

Wassereinwirkungsklasse	Art der Einwirkung
W1-E	Bodenfeuchte und nicht drückendes Wasser
W1.1-E	Bodenfeuchte und nicht drückendes Wasser bei Bodenplatten und erdberührten Wänden
W1.2-E	Bodenfeuchte und nicht drückendes Wasser bei Bodenplatten und erdberührten Wänden mit Dränung
W2-E	Drückendes Wasser
W2.1-E	Mäßige Einwirkung von drückendem Wasser $\leq 3$ m Eintauchtiefe
W2.2-E	Hohe Einwirkung von drückendem Wasser $\geq 3$ m Eintauchtiefe
W3-E	Nicht drückendes Wasser auf erdüberschütteten Decken
W4-E	Spritzwasser und Bodenfeuchte am Wandsockel sowie Kapillarwasser in und unter Wänden

Da keine exakten statischen Berechnungen und Bauteilabmessungen vorliegen, werden die Bauteildicken abgeschätzt. Die Dicke der Bodenplatte wird mit 30 cm angesetzt. Bei einer lichten Raumhöhe des Kellers von 2,20 m und der Festlegung, dass die Unterkante der Kellerrohdecke auf Höhe der Geländeoberkante liegt, beträgt der Abstand von der untersten Abdichtungsebene bis zur Geländeoberkante 2,50 m. Zur Bestimmung der erforderlichen Anzahl der Lagen der Abdichtung wird die Wassereinwirkungsklasse ermittelt (DIN 18533-1:2017-07). Sie gibt an, welcher Art der Einwirkung die Schwarze Wanne ausgesetzt ist. Nach Tabelle 51 gilt für die Liegenschaft für alle drei Expositionsklassen die Wassereinwirkungsklasse „Drückendes Wasser“ (W2-E). Innerhalb der Klasse W2-E wird weiterhin zwischen einer mäßigen (W2.1-E) und einer hohen Einwirkung (W2.2-E) unterschieden. Die Unterteilung hängt maßgeblich von der Eintauchtiefe der Kellersohle ab. Für die Expositionsklasse 1 beträgt der Hochwasserstand 0,24 m. Dies führt zu einer Eintauchtiefe von 2,74 m und einer Zuordnung zu der Wassereinwirkungsklasse W2.1-E. Bei der Expositionsklasse 2 mit einer Überflutungstiefe von 0,6 m beträgt die Eintauchtiefe bereits 3,10 m. Somit gilt für die Expositionsklassen 2 und 3 die Wassereinwirkungsklasse W2.2-E. Für die Musterliegenschaft wird für alle drei Expositionsklassen eine Polymerbitumen-Schweißbahn mit überwiegendem Polyesteranteil nach Tabelle 52 und Tabelle 53 gewählt (DIN 18533-2:2017-07). Nach Tabelle 52 muss für die Expositionsklasse mindestens eine Abdichtungslage gewählt werden, für die Expositionsklassen 2 und 3 werden allerdings nach Tabelle 53 zwei Abdichtungslagen benötigt.

Tabelle 52: Anzahl der Abdichtungslagen für Bodenplatten und Wandflächen bei W2.1-E (DIN 18533-2:2017-07)

Bahnenart	Min. Lagenanzahl
Polymerbitumen-Schweißbahn (überwiegender Polyesteranteil)	1
Bitumen- und/oder Polymerbitumen- Dachdichtungsbahnen	2
Bitumen-Schweißbahnen	
Polymerbitumen-Schweißbahnen (überwiegender Glasanteil)	

Tabelle 53: Anzahl der Abdichtungslagen für Bodenplatten und Wandflächen bei W2.2-E (DIN 18533-2:2017-07)

Bahnenart	Eintauchtiefe in m	Min. Lagenanzahl
Bitumen- und Polymerbitumen- Dachdichtungsbahnen	$\leq 4$	2
	$> 4$ und $\leq 9$	3
	$> 9$	3, davon 1 Lage mit Kupferbandeinlage
Bitumen- Schweißbahnen	$\leq 4$	2
	$> 4$ und $\leq 9$	3
	$> 9$	3, davon 1 Lage mit Kupferbandeinlage
Bitumen-Schweißbahnen	$\leq 9$	2
	$> 9$	3

Die Bauteilaufbauten für die ungedämmte und die gedämmte Kellerwand sind in der Abbildung 87 dargestellt. Die Schichtdicken können der Tabelle 54 entnommen werden. Für die vertikale Dämmung werden Schaumglasplatten in Heißbitumen verwendet. Durch die Verwendung von Schaumglasplatten ist die Abdichtungsebene vor Beschädigung geschützt, sodass auf die Noppenbahn verzichtet werden kann.

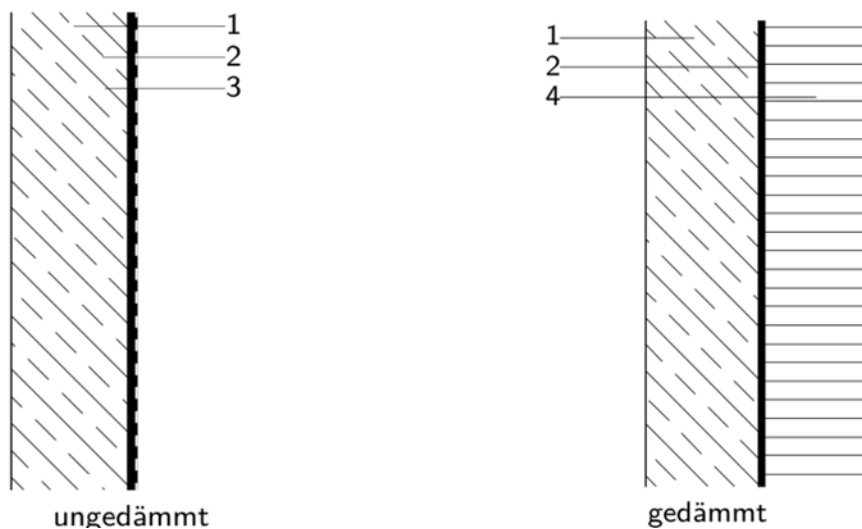


Abbildung 87: Bauteilaufbau Variante K01, Wand, gedämmt / ungedämmt

Tabelle 54: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante K01, Wand, gedämmt / ungedämmt

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Stahlbeton C25/30	25,0
2	Polymerbitumen-Schweißbahn	0,4 / 0,8
3	PE-Noppenbahn	0,1
4	Schaumglasplatten in Heißbitumen	22,0

Die Bauteilaufbauten der gedämmten und der ungedämmten Bodenplatte finden sich in der Abbildung 88 und der Tabelle 55. Bei der gedämmten Variante wird für die horizontale Wärmedämmung eine Perimeterdämmung aus Schaumglasplatten verwendet. Die Schaumglasplatten werden auf einer dünnen Kiesschüttung verlegt. Zwischen Schaumglasplatten und der Betonschicht wird eine PE-Folie als Trennlage verlegt. Um den Einbau der Perimeterdämmung zu ermöglichen, ist bei Bauten im Grundwasser für eine entsprechende Wasserhaltung und eine trockene Baugrube zu sorgen.

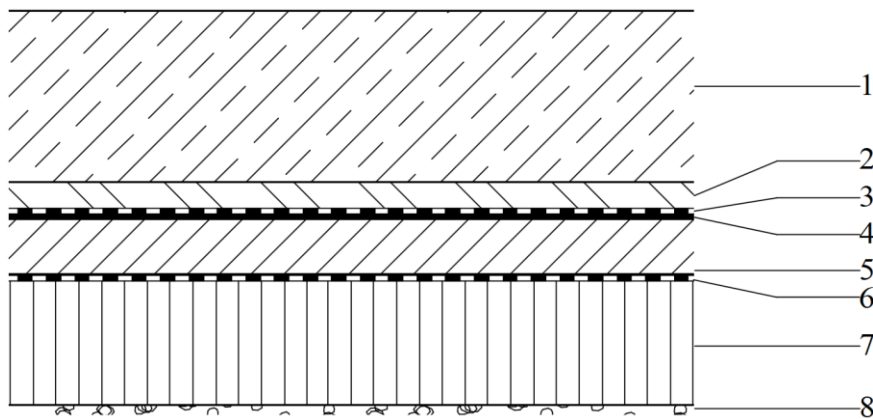


Abbildung 88: Bauteilaufbau der Variante K01, Bodenplatte, gedämmt/ungedämmt

Tabelle 55: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante K01, Bodenplatte, gedämmt/ungedämmt

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Stahlbeton C25/30	30,0
2	Zementestrich	5,0
3	PE-Folie	0,3
4	Polymerbitumen-Schweißbahn	0,4 / 0,8
5	Magerbeton	10,0
6*	PE-Folie	0,3
7*	Schaumglasplatten	21,0
8*	Kiesschicht	1,0

\*nur bei gedämmter Variante

Wie bereits in Kapitel 7.4.5 erwähnt, ist neben der Gefährdung durch eine Beschädigung der Abdichtungsschicht die Ausführung von Anschlussdetails von besonderer Relevanz. Dies beinhaltet die fachgerechte Ausführung von Wanddurchdringungen wie beispielsweise Leitungsdurchführungen mit hochwasserfesten Systemen. Ebenso sind Bewegungsfugen im Bauteil entsprechend zu berücksichtigen und fachgerecht auszuführen (DIN 18533-1:2017-07).

## K02 – Braune Wanne

In einem ersten Anpassungsschritt soll die aufgeklebte Abdichtungsebene durch das natürlich vorkommende Tonmineral Natriumbentonit ersetzt und das Bauteil als Braune Wanne ausgeführt werden. Die Abdichtung verstärkt zusätzlich zur konstruktiven Bauwerksabdichtung durch die Mindestwandstärke und die Beschränkung der Rissbreite die Dichtigkeit gegenüber anstehendem Wasser. Natriumbentonit quillt bei Kontakt mit Wasser um das bis zu 15-fache seines Volumens auf (Hestermann et al. 2015). Dadurch ist der Werkstoff in der Lage, Risse und Undichtigkeiten in der Stahlbetonstruktur abzudichten. Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit einer Abdichtung mit Bentonit ist ein äußerer Anpressdruck, hervorgerufen beispielsweise durch horizontalen Erddruck. Durch den sich nach oben reduzierenden horizontalen Erddruck kann eine Braune Wanne nur bis ungefähr 40 cm unter der Geländeoberkante ausgebildet werden. Oberhalb davon kann in einer Kombination mit der Schwarzen Wanne die Dichtigkeit sichergestellt werden. Die Verwendung einer Braunen Wanne wird im Vergleich zur Variante K01 im Hinblick auf die Ökologie positiv bewertet. Zum einen ist Bentonit ein natürliches Material, das im Gegensatz zur Abdichtung einer Schwarzen Wanne leichter in den Stoffkreislauf rückführbar ist. Zum anderen kann durch den Einbau von Natriumbentonit bei der Verwendung einer Weißen Wanne, die im Anschluss an die Braune Wanne erläutert wird, die maximal zulässige Rissbreite auf bis zu 4 mm erhöht werden (Bauwion 2019). Dadurch wird weniger Bewehrungsstahl in der Struktur benötigt und die Verarbeitung vereinfacht. Durch die doppelte Abdichtung ist die Braune Wanne sehr widerstandsfähig gegen den Lastfall „drückendes Grundwasser“ oder „fließendes Grundwasser“.

Der Bauteilaufbau der gedämmten als auch der ungedämmten Variante K02 kann der Abbildung 89 und der Tabelle 56 entnommen werden. Die Aufbringung des Bentonit auf die Außenwand erfolgt über speziell gefertigte Elemente. Bentonitgranulat wird in Trägermaterialien wie Wellkarton, Geotextil- oder Vliesmatten eingewoben, die mit der tragenden Wand vernagelt werden (Ruhnau 2010). Durch die Quellfähigkeit des Materials werden die durch die Vernagelung entstehenden Schwächungen in der Abdichtung abgedichtet (Hestermann et al. 2015). Für die Außenwand werden weiterhin in Heißbitumen verklebte Schaumglasplatten als Perimeterdämmung verwendet. Die Schaumglasplatten werden direkt auf die Bentonitmatten aufgeklebt, da sich zwischen Bentonit und der Stahlbetonwand keine Zwischenebene befinden darf. Durch die Vernagelung der Bentonitplatten mit der tragenden Wand sind ein einfacher Rückbau und eine sortenreine Trennung möglich.

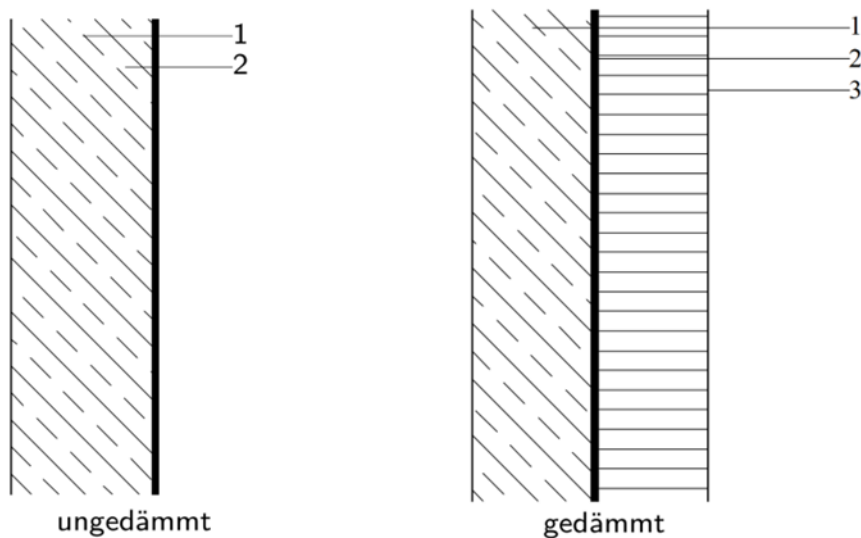


Abbildung 89: Bauteilaufbau der Variante K02, Wand, gedämmt/ungedämmt

Tabelle 56: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante K02, Wand, gedämmt/ungedämmt

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Stahlbeton C25/30	30,0
2	Bentonitmatte	0,7
3	Schaumglasplatte	22,0

Die Aufbauten für die Bodenplatte der Braunen Wanne sind nahezu identisch und sind in der Abbildung 90 und der Abbildung 91 dargestellt. Die entsprechenden Schichtdicken können der Tabelle 57 und der Tabelle 58 entnommen werden. Allerdings wird die Bentonitschicht bei der ungedämmten Variante zum Schutz mit einer Sauberkeitsschicht aus Magerbeton abgedeckt. Auf die Magerbetonschicht folgt die Bodenplatte aus Stahlbeton. Da die Bentonitplatten in einer konstanten Dicke gefertigt werden, ist die Ausführung bei allen Expositionsklassen identisch. Bei der gedämmten Variante wird die Wärmedämmung aus Schaumglasplatten auf einer Trennebene direkt unter der Bentonitlage aufgebracht. Auf die Sauberkeitsschicht kann bei Verwendung von Schaumglasplatten im Kiesbett verzichtet werden.



Abbildung 90: Bauteilaufbau der Variante K02, Bodenplatte, ungedämmt

Tabelle 57: Schichtfolgen und Schichtdicken der Variante K02, Bodenplatte, ungedämmt

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Stahlbeton C25/30	30,0
2	Bentonitmatte	0,7
3	Magerbeton	10,0

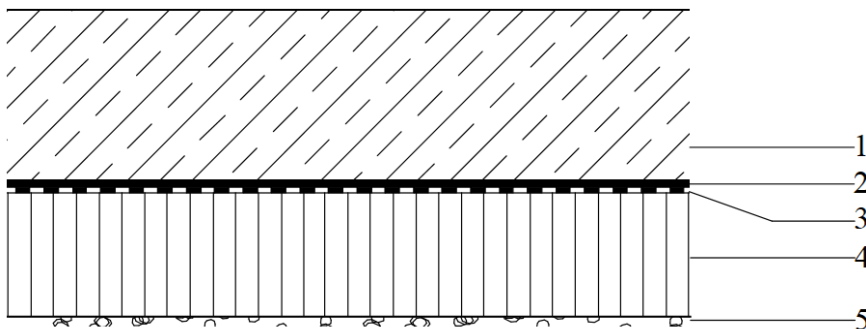


Abbildung 91: Bauteilaufbau der Variante K02, Bodenplatte, gedämmt

Tabelle 58: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante K02, Bodenplatte, gedämmt

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Stahlbeton C25/30	30,0
2	Bentonitmatte	0,7
3	PE-Folie	0,3
4	Schaumglasplatten	21,0
5	Kiesschicht	1,0

### K03 – Weiße Wanne

In einem weiteren Anpassungsschritt wird die Weiße Wanne untersucht, bei der die Abdichtungsebene in das tragende Bauteil integriert ist. Bei der Weißen Wanne wird die Dichtigkeit des Bauteils nur über deren Konstruktionsweise sichergestellt. Grundlegend für die Funktionsfähigkeit der Abdichtung ist die Beschränkung der Rissbreite auf  $d \leq 0,2$  mm. Ebenso wird entsprechend der Beanspruchungsklasse sowie der Position des Bauteils eine Mindestwandstärke festgelegt. Die Beanspruchungsklasse gibt an, welcher Art von Feuchtigkeit das Bauteil ausgesetzt ist. Aus Tabelle 59 ergibt sich, dass der Keller der Musterliegenschaft der Beanspruchungsklasse BK1 zugeordnet wird. Die Mindestwandstärke beträgt für BK1 bei Außenwänden 0,24 m und bei Bodenplatten 0,25 m (DAfStb 2017).

Tabelle 59: Beanspruchungsklassen für Weiße Wannen (Lohmeyer/Ebeling 2018)

Beanspruchungsklasse	Bezeichnung	Beanspruchungsart
BK1 Druckwasser	BK1-dW	Drückendes Grundwasser
	BK1-ndW	Nicht drückendes Grundwasser
	BK1-zaS	Zeitweise aufstauendes Grundwasser
BK2 Feuchte	BK2-nsS	Nicht stauendes Sickerwasser
	BK2-Bf	Bodenfeuchte

Die Kombination zwischen der Rissbreitenbeschränkung und der Mindestwandstärke führt dazu, dass sich der erd- bzw. wasserzugewandte Kapillarbereich und der luftzugewandte Austrocknungsbereich nicht überschneiden. Dadurch findet kein Flüssigkeitsaustausch zwischen außen und innen statt (DWA 2016). In der Abbildung 92 sind die einzelnen Bereiche mit ihren Mindestabmessungen dargestellt.

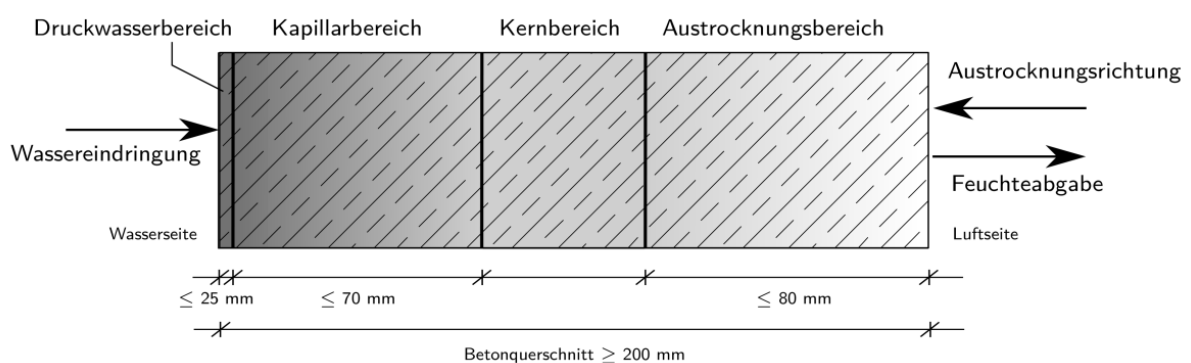


Abbildung 92: Funktionsweise und Mindestabmessungen einer Weißen Wanne, in Anlehnung an (Lohmeyer/Ebeling 2018)

Die Mindestwandstärke ist jedoch nur unter Verwendung von zusätzlichen betontechnologischen und bautechnischen Maßnahmen einhaltbar. Aufgrund des geringen Abstands der Bewehrungslagen ist ein sachgemäßes Verdichten des Betons mit den üblichen Werkzeugen nicht möglich. Daher müssen hochtechnologische Betone wie selbstverdichtende Betone (SVB) eingesetzt werden. Da der Einsatz dieser Betone im Falle eines Einfamilienhauses nicht zweckmäßig erscheint, wird die Wanddicke der Variante K03 von 25 auf 35 cm erhöht (Lohmeyer/Ebeling 2018). Somit erleichtert sich der Fertigungsprozess der Stahlbetonwand. Die Bauteilaufbauten für die gedämmte und die ungedämmte Varianten sind in der Abbildung 93 und der Tabelle 60 dargestellt. Sowohl für die Bodenplatte als auch für die Außenwand wird wie für die Varianten K01 und K02 Schaumglasplatten verwendet, die auf einer dünnen Kiesschicht verlegt werden. Der Bauteilaufbau ist dabei nahezu identisch zur Außenwand und ist in der Abbildung 94 sowie der Tabelle 61 dargestellt.

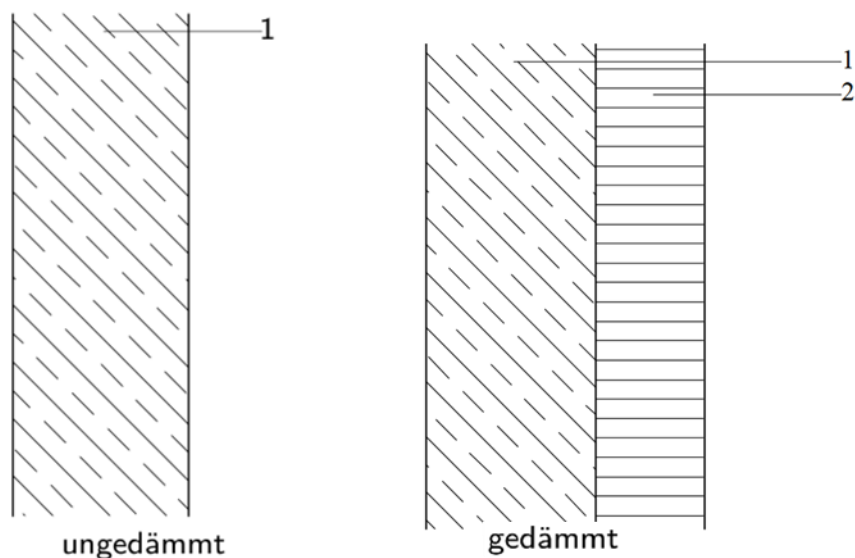


Abbildung 93: Bauteilaufbau der Variante K03, Wand, ungedämmt/gedämmt

Tabelle 60: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante K03, Wand, gedämmt/ungedämmt

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Stahlbeton C30/37	30,0
2	Schaumglasplatten	22,0

Voraussetzung für die Funktionsweise einer Weißen Wanne ist, dass die Parameter der Betonqualität wie beispielsweise die Festigkeitsklasse oder die Expositionsklasse die besonderen Anforderungen erfüllen, die sich aus der Konstruktion ergeben. Weiterhin ist wie bei der Schwarzen Wanne auf eine fachgerechte Ausführung der Wanddurchführungen zu achten. Fensteröffnungen oder Kellertüren sind durch eine entsprechende konstruktive Ausführung zu sichern (Lohmeyer/Ebeling 2018).

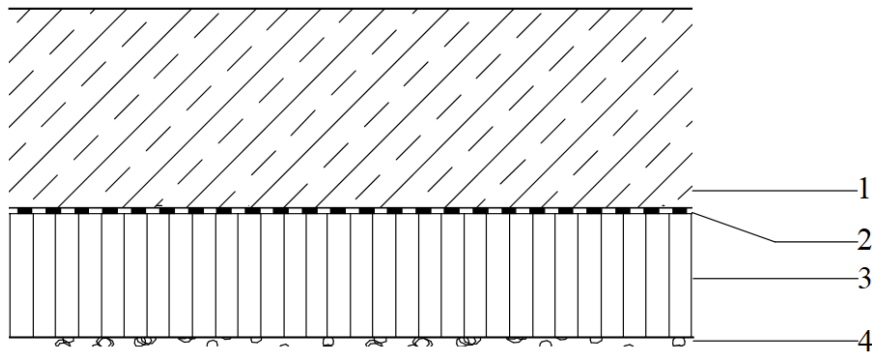


Abbildung 94: Bauteilaufbau der Variante K03, Bodenplatte, gedämmt/ungedämmt

Tabelle 61: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante K03, Bodenplatte, gedämmt/ungedämmt

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Stahlbeton C30/37	30,0
2	PE-Folie	0,3
3*	Schaumglasplatten	21,0
4*	Kiesschicht	1,0

\*nur bei gedämmter Variante

Bei der Weißen Wanne ist ein einfacherer Rückbau möglich, da nur zwei Materialien, Beton und Bewehrungsstahl, verwendet werden. Die sortenreine Trennung von Stahl und Beton ist heutzutage ohne großen Aufwand möglich. Nachteilig an der Weißen Wanne sind jedoch der relativ große Bewehrungsgehalt und die sehr aufwendige Planung.

## Analyse

### Lebenszyklusanalyse

Nach der Erarbeitung von drei Varianten zur hochwassergerechten Ausführung des Kellers, werden diese im Hinblick auf die Lebenszyklusanalyse und die Rückbaubarkeit untersucht. Für die ökobilanzielle Untersuchung des Kellers werden die Außenwände und die Bodenplatte getrennt betrachtet, da die Bauteilaufbauten voneinander abweichen. Ebenso wird unterschieden zwischen der gedämmten und der ungedämmten Variante. Die Ökobilanz für die Braune Wanne wurde händisch berechnet, da Bentonit in der ÖKOBAUDAT nicht aufgeführt ist. Zur Ermittlung der Umweltwirkungen von Bentonit wurde ein externer Datensatz verwendet (UBA 2012). Der Datensatz berücksichtigt allerdings nur den Abbau von Bentonit. Die weitere Verarbeitung und die Herstellung der Bentonitmatten ist von offizieller Stelle noch nicht bilanziert. Somit ist zumindest über die Abdichtungsebene der Braunen Wanne keine klare Aussage möglich. Allerdings wird davon ausgegangen, dass die Umweltwirkungen der Bentonitmatten aufgrund der Herkunft, des einfachen Abbaus von Bentonit aus regionalen Abbaustätten, der einfachen Weiterverarbeitung sowie den geringen Schichtstärken von ungefähr 7 mm verhältnismäßig gering sind.

Die ermittelten Werte für die Wirkungskategorien Treibhauspotential (GWP) und nicht erneuerbarer Primärenergiegehalt (PENRT) für die ungedämmte Außenwand des Kellers können der Abbildung 95 und der Abbildung 96 entnommen werden. Für die Variante K01 müssen für die Expositionsklassen 2 und 3 zwei Abdichtungsschichten aufgebracht werden. Folglich ist das Treibhauspotential sowie der fossile Energiebedarf für die Expositionsklassen 2 und 3 höher als für die Expositionsklasse 1. Deutlich zeigt sich der große Einfluss der Polymerbitumen- Abdichtungsbahn sowie der Noppenbahn.



Bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus für die Variante K01 für die Expositionsklassen 2 und 3 sind ungefähr 22 % des Treibhauspotentials und ungefähr 45 % des fossilen Energiebedarfs auf die Abdichtungsbahn und die Noppenbahn zurückzuführen.

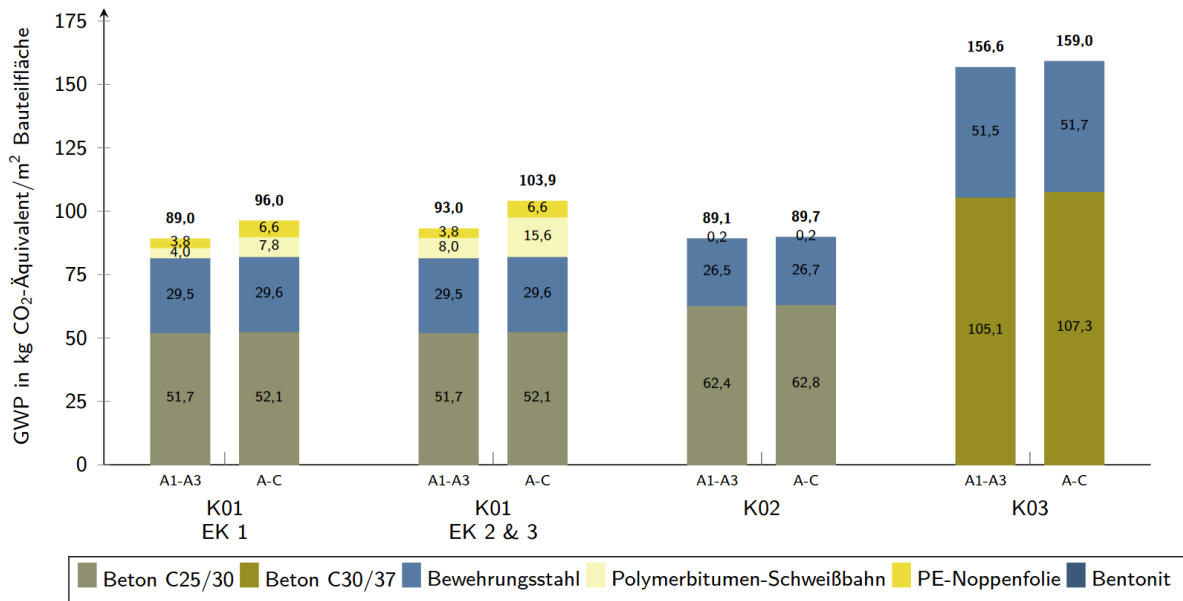


Abbildung 95: GWP Kellerwand, ungedämmt, in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

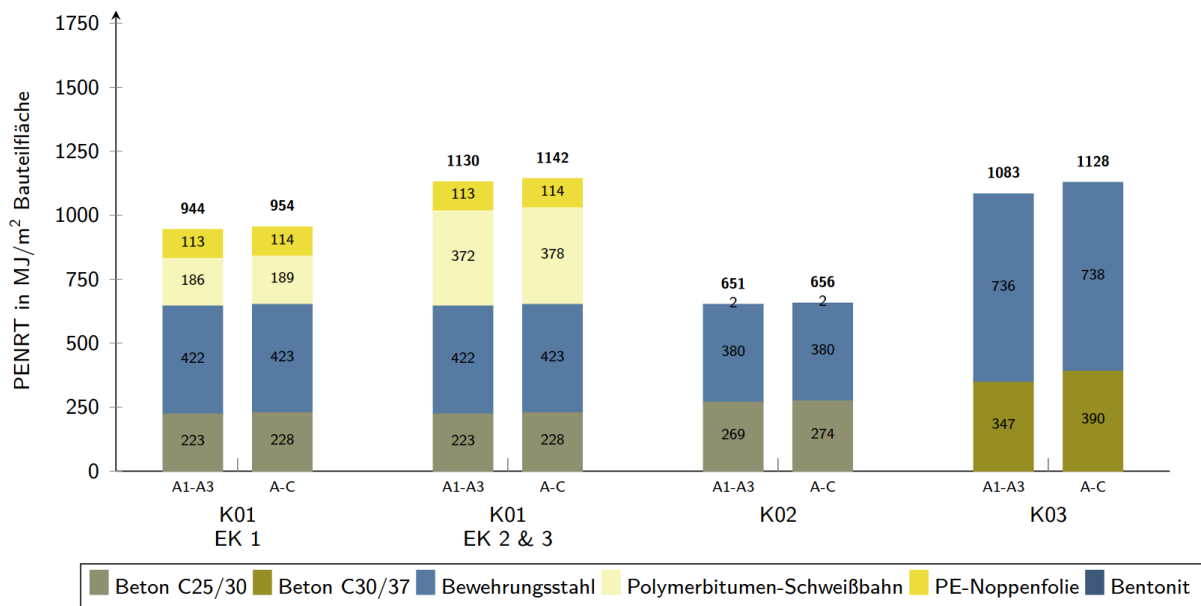


Abbildung 96: PENRT Kellerwand, ungedämmt, in MJ/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

Für das Treibhauspotential sind die Werte für die Variante K03 am höchsten. Dies ist vor allem auf die größere Dicke und die höhere Betonqualität der Weißen Wanne zurückzuführen. Für den fossilen Energiebedarf hingegen sind die Werte der Variante K03 niedriger als für die Expositionsklassen 2 und 3 der Variante K01. Dies ist insbesondere auf die hohen Werte für die Abdichtungen zurückzuführen. Auch am Beispiel der Bodenplatte zeigt sich in der Abbildung 97 und der Abbildung 98, welchen Einfluss die Betrachtung des vollständigen Lebenszyklus auf die Wirkungskategorien hat.

Für die ungedämmte Bodenplatte fallen für die Variante K01 keine Instandhaltungsarbeiten und kein Austausch der Bitumenbahn an, da diese zwischen der Bodenplatte und dem Abdichtungsuntergrund aufgebracht wird. Somit ist sie unzugänglich und weist dieselbe Lebensdauer auf, wie die einschließenden Bauteile. In der Abbildung 97 zeigt sich dementsprechend, dass der Wert des GWP bei der Variante K01 für die Phasen A - C für alle Expositionsklassen im Vergleich zur Außenwand nahezu identisch zur Herstellungsphase (A1 - A3) ist. Die Variante K03 erreicht bei der Bodenplatte die höchsten Werte mit ungefähr 160 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent und liegt ungefähr 15 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent über dem Wert der Variante K01 für die Expositionsklassen 2 und 3. Ebenso zeigt sich der Einfluss der erforderlichen Unter- und Schutzkonstruktion der Abdichtung bei der Variante K01. Der Abdichtungsuntergrund von rund 10 cm sowie die Abdichtungsebene und der sich darüber befindende Schutzestrich und die Dampfbremse tragen bei der Expositionsklasse 2 und 3 sowohl beim GWP als auch beim PENRT zu ungefähr 30 - 40 % bei. Aufgrund der mangelnden Datengrundlage kann auch bei der Bodenplatte keine eindeutige Aussage über die Variante K02 getroffen werden.

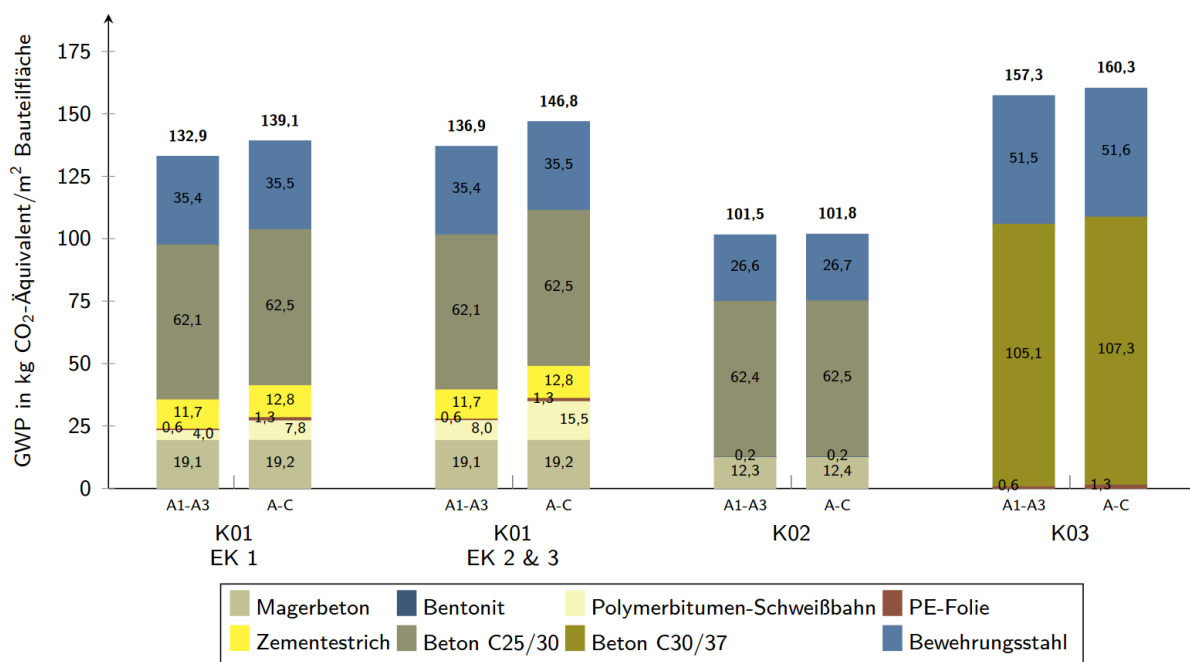


Abbildung 97: GWP Bodenplatte, ungedämmt, in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

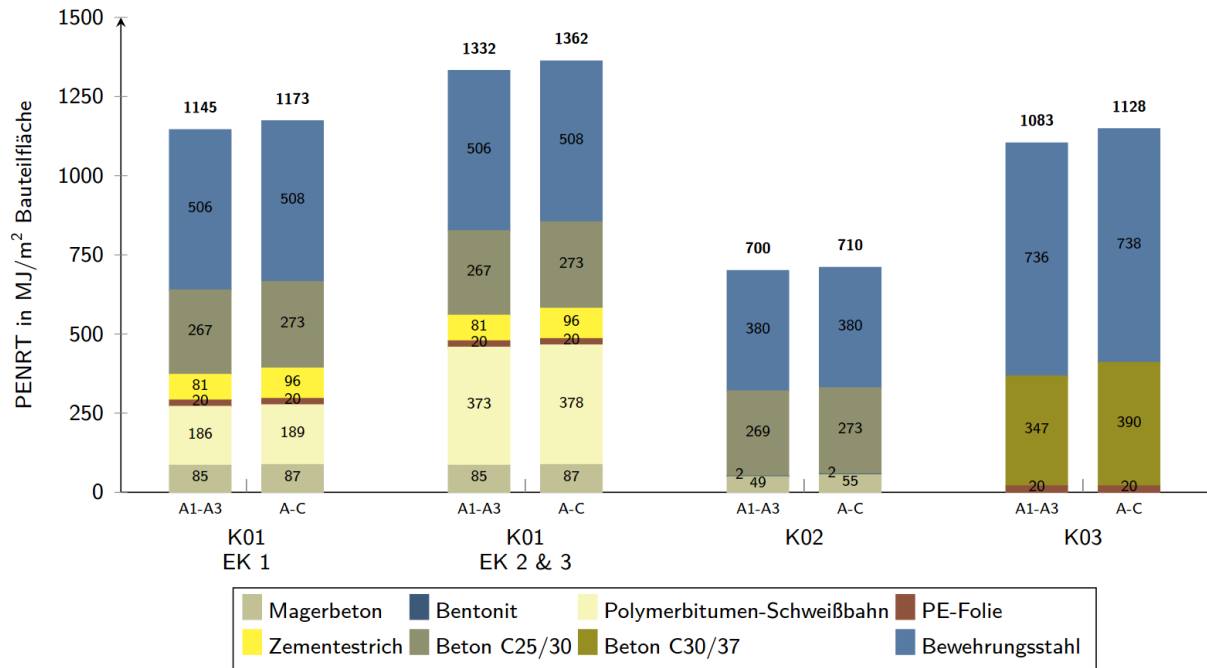


Abbildung 98: PENRT Bodenplatte, ungedämmt, in MJ/m² Bauteilfläche

Für die gedämmte Variante der Außenwand des Kellers in der Abbildung 99 und Abbildung 100 nehmen die Werte in beiden Wirkungskategorien für alle Variante zu. Dies ist auf die verwendeten Schaumglasplatten zurückzuführen, die zudem noch verklebt werden.

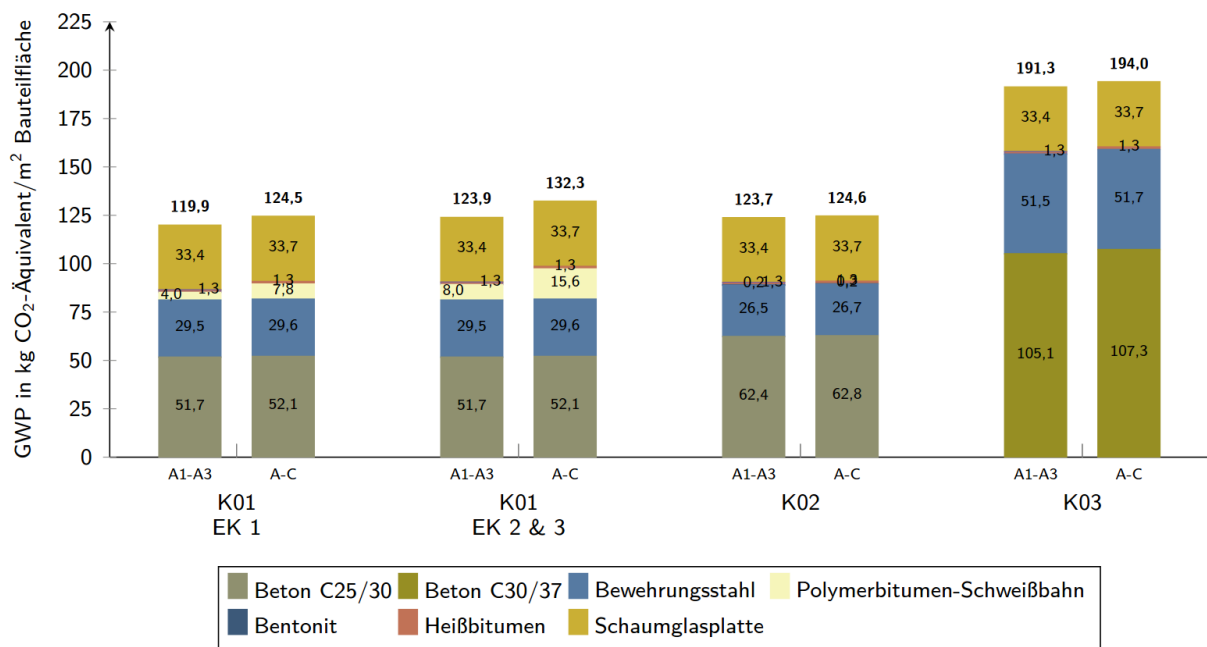


Abbildung 99: GWP Kellerwand, gedämmt, in kg CO₂-Äquivalent/m² Bauteilfläche

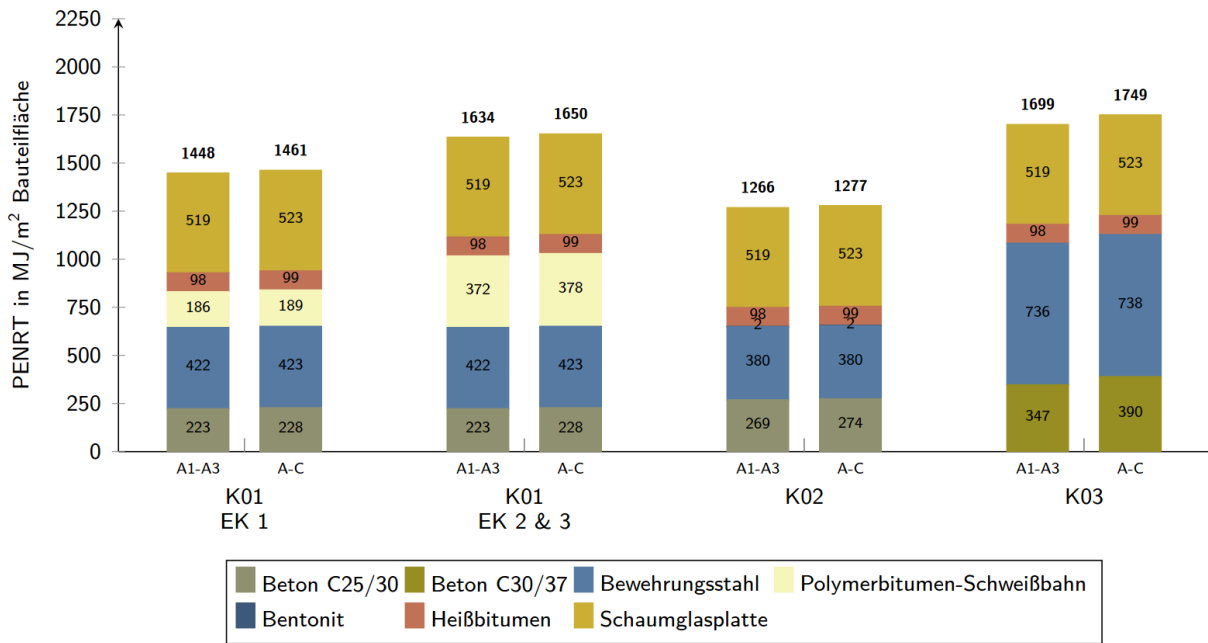


Abbildung 100: PENRT Kellerwand, gedämmt, in MJ/m² Bauteilfläche

Die Bilanzierungsergebnisse für die gedämmte Bodenplatte sind in der Abbildung 101 und der Abbildung 102 dargestellt. Für alle Varianten werden Schaumglasplatten als Dämmmaterial verwendet. Die absolute Summe der Werte in den Wirkungskategorien nimmt zwar zu, das Verhältnis der Varianten zueinander bleibt jedoch konstant.

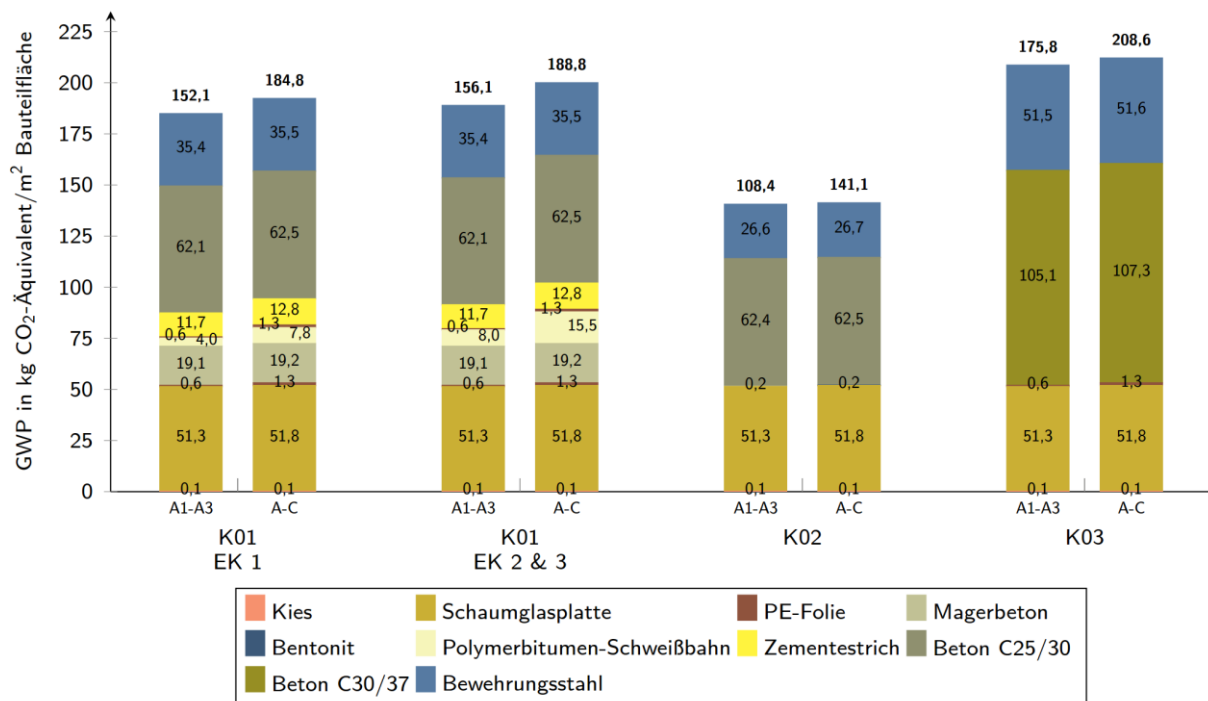


Abbildung 101: GWP Bodenplatte, gedämmt, in kg CO2-Äquivalent/m² Bauteilfläche

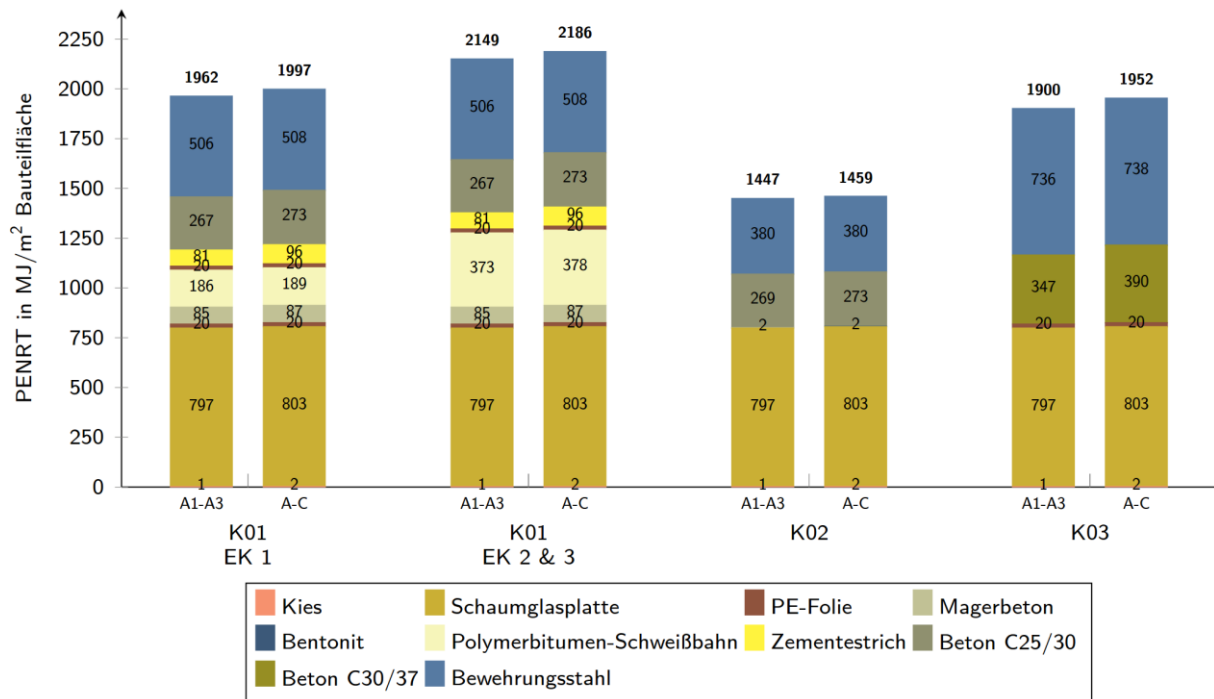


Abbildung 102: PENRT Bodenplatte, gedämmt, in MJ/m² Bauteilfläche

### Rückbaubarkeit

Die Bewertung der Rückbaubarkeit der verschiedenen Bauteilaufbauten des Kellers erfolgt in einem ersten Schritt über die in Kapitel 4.2 beschriebene Methodik. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 62 dargestellt. Für die Bodenplatte ergibt die Berechnung für die ungedämmte Ausführung einer Schwarzen Wanne einen gewichteten Recyclingfaktor von 64,76. Für die Weiße Wanne hingegen beträgt dieser Wert 63,39. Dies ist insofern nicht realistisch, da die Schwarze Wanne aufgrund der verschiedenen Schichten wie der Abdichtungsbahn, der Schutzschicht sowie dem Abdichtungsuntergrund einen deutlich höheren Aufwand zur sortenreinen Trennung der Bauteilschichten erfordert bzw. durch die Verklebung eine sortenreine Trennung nicht möglich ist. Die Weiße Wanne als monolithische Bauweise kann hingegen ohne größeren Aufwand recycelt werden. Das Ergebnis wird sehr stark durch den hohen Massenanteil der Schichten aus mineralischen Baustoffen bestimmt. Der Recyclingfaktor der Bitumenbahn fällt bei der Variante K01 mit einem Massenanteil von 0,4 % an der Gesamtmasse des Bauteils nahezu nicht ins Gewicht. Für ein realistisches Bemessungsergebnis werden an dieser Stelle die tragenden Bauteile vernachlässigt. Da die Bodenplatte respektive die Außenwände bei der Weißen Wanne jedoch Teil des Abdichtungskonzepts sind, ist kein vergleichbares Ergebnis für die Variante K03 möglich. Die Bewertung der Rückbaubarkeit über die Methodik des BNB-Kriteriums ist aufgrund der erwähnten Gründe nicht plausibel. Um die Bewertungen realistischer zu gestalten, wird für die Kelleraufbauten auf eine Bewertung über den Recyclingfaktor verzichtet und eine qualitative Bewertung der drei verschiedenen Aufbauten vorgenommen.

Die Weiße Wanne wird für alle Positionen und Ausführungen als beste Variante eingeschätzt. Dies liegt daran, dass die tragende Ebene gleichzeitig die abdichtende Ebene beinhaltet und es sich beim ungedämmten Bauteil um ein Einstoffbauteil handelt. Für die gedämmte Ausführung kann für die Weiße Wanne ein einfach rückbaubares Perimeter-Dämmsystem verwendet werden. Etwas schlechter wird die Braune Wanne eingeschätzt. Zwar wird mit Bentonit ein natürlicher Werkstoff verwendet und der Verbund zwischen der Bentonitmatte und der tragenden Betonwand ist relativ leicht lösbar. Zusätzlich können zumindest die Außenwände schmaler ausgeführt werden, was zu einer Materialeinsparung führt. Dennoch müssen zwei Ebenen getrennt werden.

Die Schwarze Wanne wird als schlechteste Variante eingeschätzt, da durch die Verklebung und die Verschweißung der Bitumenbahn eine unlösbare Verbindung entsteht. Eine sortenreine Rückführung in den Stoffkreislauf ist so nicht mehr für alle Ebenen möglich.

Tabelle 62: Recyclingfaktor Keller

Variante	Recyclingfaktor R				
	Ausführung	Kellerwand	Kellerwand	Bodenplatte	Bodenplatte
		Ungedämmt	Gedämmt	Ungedämmt	gedämmt
K01	61,64	61,01	64,76	64,83	
K02	62,04	61,48	63,39	62,74	
K03	62,00	61,53	63,20	62,50	

### 7.5.5. Fußboden

Wie in Kapitel 7.5.3 beschrieben entsteht bei der Expositionsklasse 1 kein Schaden für den Fußbodenaufbau, da durch konstruktive oder temporäre Schutzmaßnahmen ein Eindringen des Wassers in das Gebäude verhindert wird. Somit gelten die im Weiteren beschriebenen Maßnahmen nur für die Expositionsklassen 2 und 3. Da es aber für die Gefährdung des Fußbodenaufbaus unerheblich ist, welchen Wasserstand das Wasser über dem Fußboden erreicht, werden die Expositionsklassen in diesem Kapitel nicht getrennt betrachtet. Für den Fußbodenaufbau wird entsprechend der Bodenplatte der Musterliegenschaft ein U-Wert von  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  angesetzt. Für die Varianten F02, F03 und F04 werden jeweils eine gedämmte und eine ungedämmte Variante untersucht. Wird eine Perimeterdämmung im Keller verwendet, entfällt die Wärmedämmung des Fußbodenaufbaus. Wird der Keller ungedämmt und unbeheizt ausgeführt, muss die Wärmedämmung im Fußbodenaufbau oder an der Unterseite der Kellerdecke angeordnet werden. Im vorliegenden Fall wurde davon ausgegangen, dass die Dämmung im Fußbodenaufbau angeordnet wird, da dies für den gesamten Fußbodenaufbau im Hochwasserfall den kritischeren Fall darstellt. Prinzipiell kann auch immer der ungedämmte Fußbodenaufbau ausgeführt werden und stattdessen eine Dämmung unter der Bodenplatte des nichtunterkellerten Bereichs und an der Unterseite der Kellerdecke mit entsprechender Flankendämmung ausgeführt werden. Dies birgt aber Nachteile durch die erhöhte Gefährdung durch Wärmebrücken und die aufwendigere Verlegung von Leitungen an der Unterseite der Kellerdecke. Die Dicke der tragenden Unterkonstruktion aus Stahlbeton wird zur besseren Vergleichbarkeit der Varianten jeweils mit 15 cm angesetzt. Die untersuchten Varianten des Fußbodenaufbaus sind:

- F01 - Gussasphaltestrich,
- F02 - schwimmender Zementestrich,
- F03 - leicht rückbaubarer Bodenbelag,
- F04 - dichter Bodenbelag.

#### F01 – Gussasphaltestrich

Die Variante F01 wird nur ungedämmt ausgeführt. Der Wärmeschutz des Kellers erfolgt bei Bedarf über eine entsprechende Perimeterdämmung. Der Bauteilaufbau in der Abbildung 103 sowie der Tabelle 63 sieht einen Gussasphaltestrich auf der Bodenplatte aus Stahlbeton vor. Gussasphalt ist ein Gemisch, das hauptsächlich aus Bitumen und Mineralstoffen besteht und bietet den Vorteil einer hohen Unempfindlichkeit gegen Wasser. Da für die Verarbeitung von Gussasphalt kein Wasser benötigt wird, kommt es zu keiner Formänderung durch Schwinden infolge von Austrocknung. Der Gussasphaltestrich kann daher bis an die Außenwände geführt werden, ohne dass in den Keller eindringendes Wasser zwischen Wand und Gussasphaltestrich fließen kann (Hestermann et al. 2015).

Verunreinigungen durch eindringendes Flutwasser können aufgrund der glatten Oberfläche und der Wasserundurchlässigkeit des Materials nicht in die Konstruktion eindringen und die Oberfläche des Estrichs kann nach dem Rückgang des Wassers einfach gesäubert werden. Die Variante F01 ist ausschließlich für den Kellerfußboden vorgesehen. Da die direkte Verarbeitung von Gussasphaltestrich auf Stahlbeton weniger geeignet ist, wird eine Bitumen-Schweißbahn als Trennschicht verwendet (Hestermann et al. 2015).

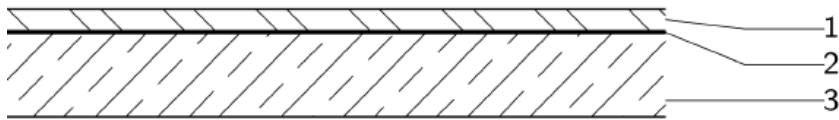


Abbildung 103: Fußbodenaufbau F01 Gussasphaltestrich

Tabelle 63: Schichtenfolge und Schichtdicken des Fußbodenaufbaus F01

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Gussasphaltestrich	4,0
2	Polymerbitumen-Schweißbahn	0,4
3	Stahlbeton C25/30	15,0

### F02 - schwimmender Zementestrich

Der aus den Plänen der Musterliegenschaft entnommene Standardfußbodenaufbau sieht über der Stahlbetondecke jeweils eine Wärmedämmung und eine Trittschalldämmung aus EPS sowie einen schwimmenden Zementestrich vor. Der Fußbodenbelag ist nicht vorgegeben, es wird ein Fußbodenbelag aus Mehrschichtparkett angenommen. Der Aufbau der Variante F02 kann der Abbildung 104 sowie der Tabelle 64 entnommen werden. Am Beispiel des schwimmenden Zementestrichs wird deutlich, dass mehrschichtige Fußbodenaufbauten stets als Verbund zu sehen sind. Zementestrich eignet sich prinzipiell gut als hochwasserfestes Material, die Gefährdung resultiert allerdings aus den darunterliegenden Dämmstoffen (Hestermann et al. 2015). Wird der Fußbodenaufbau überflutet, besteht aufgrund der Auftriebskräfte der Dämmstoffe die Gefahr der Zerstörung des eigentlich wasserwiderstandsfähigen Estrichs. Hochwasser kann somit zu einer irreversiblen Beschädigung und zu einer vollständigen Erneuerung führen (DWA 2016). Die Variante F02 ist für den gewählten Standort für die Expositionsklasse 1 gut geeignet, da davon ausgegangen wird, dass es aufgrund temporärer oder konstruktiver Maßnahmen noch nicht zu einer Überflutung des Fußbodens kommt. Für die Expositionsklassen 2 und 3 hingegen sollte die Variante F02 angepasst werden.

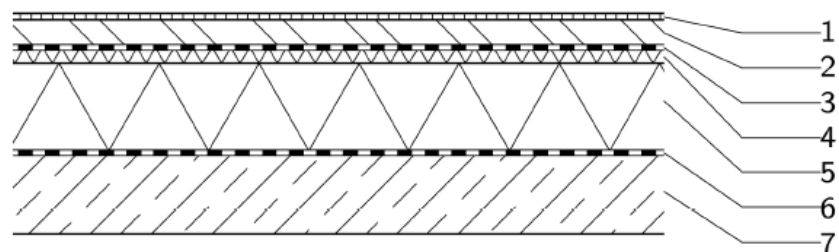


Abbildung 104: Fußbodenaufbau F02 schwimmender Zementestrich

Tabelle 64: Schichtenfolge und Schichtdicken des Fußbodenaufbaus F02

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Mehrschichtparkett	1,20
2	Zementestrich	5,00
3	Dampfsperre	0,03
4	EPS-Trittschalldämmung	3,00
5*	EPS-Wärmedämmung	16,00
6	PE-Folie	0,03
7	Stahlbeton C25/30	15,00

\* nur bei gedämmter Variante

In einem nächsten Anpassungsschritt sollen daher zwei weitere Varianten des Fußbodenaufbaus untersucht werden, die unterschiedliche Ansätze im Umgang mit Hochwasser verfolgen. Bei der Variante F03 wird der Fußbodenaufbau so ausgeführt, dass ein einfacher Rückbau und Austausch bzw. eine einfache Trocknung der betroffenen Schichten möglich ist. Bei der Variante F04 hingegen wird der Fußboden dicht ausgeführt, sodass Wasser nicht in die gefährdeten Schichten des Fußbodenaufbaus eindringen kann.

### F03 - leicht rückbaubarer Bodenbelag

Die Bauteilaufbauten der gedämmten und der ungedämmten Variante F03 sind in der Abbildung 105 und der Abbildung 106 sowie der Tabelle 65 und der Tabelle 66 dargestellt. Bei dieser Variante ist der Wassereintritt bis zu einer gewissen Schicht des Fußbodenaufbaus zulässig. Oberhalb dieser Schicht wird ein Fußbodenaufbau gewählt, der eine einfache Rückbaubarkeit und Erneuerung der betroffenen Schichten zulässt. Oberhalb der Betondecke ist eine Wärmedämmung aus in Heißbitumen verlegtem Schaumglas vorgesehen. Dies führt zu einer vollflächigen und vollfugigen Verbindung mit der Stahlbetondecke, sodass das Wasser nicht bis hier vordringen kann. Die Verklebung wirkt sich allerdings negativ auf die Rückbaubarkeit aus. Geschütteter Schaumglasschotter ist nicht zu empfehlen, da im Hochwasserfall die Gefahr von Aufschwimmen des Dämmstoffs besteht. Oberhalb der Wärmedämmebene wird ein Gussasphaltestrich mit Randdämmstreifen, die Trittschalldämmung und der Fußbodenbelag verlegt. Die beiden obersten Schichten sind nicht resistent gegen Wasser, können allerdings relativ einfach ausgetauscht werden. Unter der Annahme, dass es während der Nutzungsdauer des Gebäudes zu mindestens einem Austausch des Fußbodenbelags aufgrund von eindringendem Wasser kommt, sollten Materialien mit niedrigem Energiebedarf oder leicht rezyklierbare, ökologische Werkstoffe verwendet werden. Die Trittschalldämmung wird daher aus expandiertem Kork und der Fußbodenbelag als Mehrschichtparkett ausgeführt. Bei der ungedämmten Variante in der Abbildung 106 muss wie bei der Variante F01 eine Bitumen-Schweißbahn zwischen Stahlbetondecke und Gussasphaltestrich aufgebracht werden.

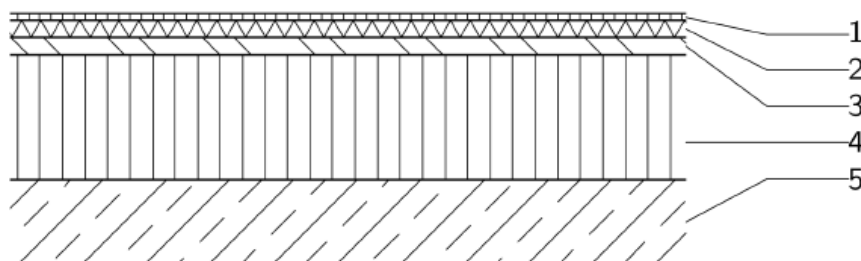


Abbildung 105: Fußbodenaufbau F03 leicht rückbaubarer Bodenbelag, gedämmt



Tabelle 65: Schichtenfolge und Schichtdicken des Fußbodenaufbaus F03, gedämmt

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Mehrschichtparkett	1,20
2	Expandierter Kork (Trittschalldämmung)	1,00
3	Gussasphaltestrich	3,00
4	Schaumglas in Heißbitumen	18,00
5	Stahlbeton C25/30	15,00

Im Hochwasserfall der Expositionsklasse 2 und 3 müssen zwar die Trittschalldämmung und das Mehrschichtparkett rückgebaut und erneuert werden. Allerdings haben beide Schichten einen sehr geringen Energiebedarf in der Herstellung und können zudem gut recycelt werden. Der Gussasphaltestrich und die Schaumglasdämmung hingegen werden durch eindringendes Wasser nicht gefährdet. Trocknungsmaßnahmen müssen dennoch durchgeführt werden, da über den Randstreifen Wasser unter den Estrich gelangen kann. Im Zuge einer langfristigen Gebäudeinstandhaltung muss das anfallende Wasser aus dem Bauteilaufbau entfernt werden. Der Rücktrocknungsprozess ist jedoch deutlich einfacher zu bewerkstelligen als beispielsweise bei der Variante F02, da Schaumglas im Gegensatz zu anderen Dämmstoffen das Wasser nicht aufnimmt.

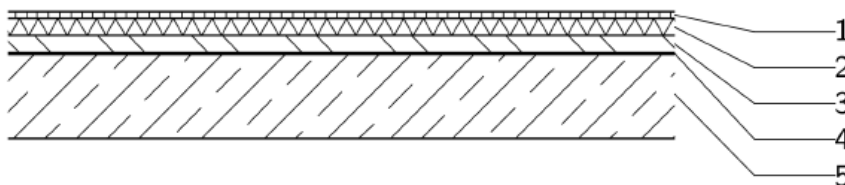


Abbildung 106: Fußbodenaufbau F03 leicht rückbaubarer Bodenbelag, ungedämmt

Tabelle 66: Schichtenfolge und Schichtdicken des Fußbodenaufbaus F03, ungedämmt

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Mehrschichtparkett	1,20
2	Expandierter Kork (Trittschalldämmung)	1,00
3	Gussasphaltestrich	3,00
4	Polymerbitumen-Schweißbahn	0,40
5	Stahlbeton C25/30	15,00

#### F04 - dichter Bodenbelag

Neben der Anforderung eines leichten Rückbaus des Fußbodenbelags im Hochwasserfall wird mit der Variante F04 eine Variante definiert, die im Hochwasserfall resistent gegenüber dem eindringenden Wasser ist und keinerlei aufwendige Austausch- oder Trocknungsmaßnahmen nach sich zieht. Die Aufbauten der gedämmten und der ungedämmten Variante F04 sind in Abbildung 107 und Abbildung 108 sowie der Tabelle 67 und der Tabelle 68 dargestellt. Oberhalb der Stahlbetondecke wird identisch zur Variante F03 als Dämmstoff Schaumglas in Heißbitumen verwendet. Darauf folgt ein Gussasphaltestrich, der aber im Gegensatz zur Variante F03 aufgrund der fehlenden Trittschalldämmung ohne Randstreifen ausgeführt werden kann. Den Bodenbelag bilden Fliesen im Dünnbettmörtel.

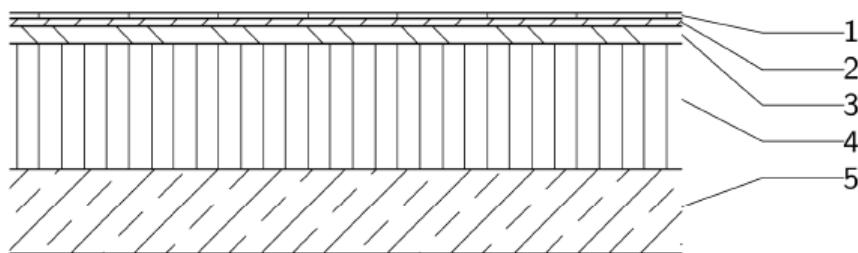


Abbildung 107: Fußbodenaufbau F04 dichter Bodenbelag, gedämmt

Tabelle 67: Schichtenfolge und Schichtdicken des Fußbodenaufbaus F04, gedämmt

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Keramische Fliesen	1,00
2	Dünnbettmörtel	1,50
3	Gussasphaltestrich	3,00
4	Schaumglas in Heißbitumen	20,00
5	Stahlbeton C25/30	15,00

Fliesen, insbesondere keramische Spaltplatten oder Steinzeugfliesen mit einer geringen Wasseraufnahme, bieten aufgrund ihrer dichten Porenstruktur eine hohe Resilienz gegen eindringendes Wasser. Dennoch sind Fliesenkonstruktionen nicht vor eindringendem Wasser geschützt. Über das Fugenraster findet ein kapillarer Eintrag von Wasser in die Konstruktion statt und kann die darunter liegenden Schichten beeinträchtigen (DWA 2016). Daher muss unter den Fliesen eine vollflächige Abdichtung in Form des Gussasphaltestrichs und der in Heißbitumen verlegten Schaumglasplatten erfolgen.

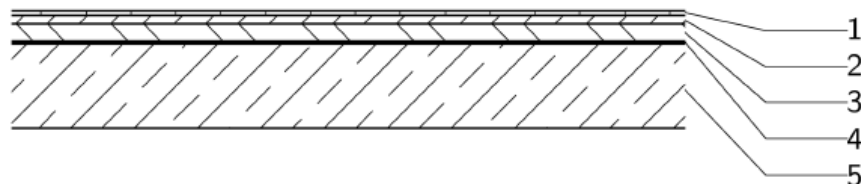


Abbildung 108: Fußbodenaufbau F04 dichter Bodenbelag, ungedämmt

Tabelle 68: Schichtenfolge und Schichtdicken des Fußbodenaufbaus F04, ungedämmt

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Keramische Fliesen	1,00
2	Dünnbettmörtel	1,50
3	Gussasphaltestrich	3,00
4	Polymerbitumen-Schweißbahn	0,40
5	Stahlbeton C25/30	15,00

Da es sich bei der Musterliegenschaft um ein Einfamilienhaus handelt, werden keine normativen Anforderungen an die Schallübertragung über Trittschalldämmung gestellt. Aus diesem Grund wird auf eine zusätzliche Trittschalldämmung verzichtet und eine höhere Belastung durch Trittschall akzeptiert (vgl. Nikowski 2014). Positiv auf die Trittschallübertragung wirkt sich allerdings der Gussasphaltestrich aufgrund seiner hohen inneren Dämpfung aus (Hestermann et al. 2015). Eine weitere Möglichkeit des Schutzes einzelner Ebenen vor Durchfeuchtung ist die Verwendung einer Verbundabdichtung.

Bei einer Verbundabdichtung wird auf den Untergrund eine Streich- oder Spachtelabdichtung im Haftverbund aufgebracht. Auf diese Abdichtung wird ebenso im Haftverbund eine Schutzschicht aus Fliesenbelag im Dünnbettmörtel aufgetragen. Die Ausführung erfolgt in mehreren Schichten. Wichtig ist bei der Verbundabdichtung die Weiterführung an den angrenzenden Wänden, um Feuchteintritt durch Hinterlaufen zu vermeiden. Neben dem Schutz vor Durchfeuchtung ist der Verzicht auf aufwändige Schutzschichten aus Estrich als Vorteil zu nennen (Hestermann et al. 2015: 731).

Die Variante F04 ist bei der Musterliegenschaft für die Expositionsclassen 1, 2 und 3 geeignet. Für die Expositionsclassen 1, bei der noch kein Schaden zu erwarten ist, ist die Variante jedoch sehr aufwendig. Hier scheint die Variante F02 als einfacher zu fertigende Konstruktion und mit besseren akustischen Eigenschaften besser geeignet. Zur Verbesserung der Klimapotentiale Treibhauspotential und fossiler Energiebedarf könnte die Dämmung durch ein Dämmmaterial mit vorteilhafteren Umwelt- und Wirkindikatoren ersetzt werden. Durch die hohe Resilienz gegenüber Hochwasser ist die Variante F04 zusätzlich gut für Gebäude geeignet, bei denen der Wasserstand der Expositionsclassen 1 deutlich höher ist als beim gewählten Standort der Musterliegenschaft und bei dem häufiger Schäden durch Überflutung zu erwarten sind.

## Analyse

### Lebenszyklusanalyse

Im Rahmen der hier durchgeführten Lebenszyklusanalyse wurde davon ausgegangen, dass innerhalb des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren ein Schadenereignis eintritt. Für den Fußbodenaufbau werden sowohl die gedämmte als auch die ungedämmte Variante untersucht. Zuerst werden die Ergebnisse der gedämmten Varianten analysiert. Bei der Betrachtung der Wirkungskategorien in Abbildung 109 und Abbildung 110 zeigt sich, dass die Variante F01 sowohl beim Treibhauspotential als auch beim fossilen Energieverbrauch die niedrigsten Werte aufweist. Das liegt in erster Linie daran, dass bei der Variante F01 die Dämmung als Perimeterdämmung unter der Bodenplatte angeordnet wird und die Konstruktion zeitgleich eine hohe Resilienz gegen Wasser aufweist. Dadurch muss sie im Überflutungsfall nicht rückgebaut werden. Sowohl die Werte des GWP als auch die Werte des PENRT unterscheiden sich zwischen der Herstellungsphase und des ganzen Lebenszyklus im Gegensatz zur gedämmten Ausführung der Variante F02 kaum. Beim Vergleich der beiden Varianten zeigt sich, dass das Treibhauspotential von F01 in der Herstellungsphase noch knapp 80 % der Variante F02 beträgt. Nach Berücksichtigung der Instandhaltung und der Entsorgung beträgt das Treibhauspotential von F01 nur noch knapp 40 % des Werts von F02. Beim fossilen Energiebedarf sind die Werte in der Herstellungsphase nahezu identisch. Unter Berücksichtigung der Instandhaltung und der Entsorgung hingegen, beträgt der fossile Energiebedarf der Variante F01 nur noch 63 % des fossilen Energiebedarfs der Variante F02.

Im Vergleich mit den Varianten F03 und F04 wird deutlich, dass die Variante F02 in den Phasen A - C beim Treibhauspotential die höchsten Werte aufweist. Dies ist insbesondere dahingehend interessant, dass für die Variante F04 bei alleiniger Betrachtung der Herstellungsphase in beiden Wirkungskategorien höhere Werte als für die Variante F02 bilanziert werden. Einen relativ großen Anteil an der nachteiligen Bilanz der Variante F02 in der Herstellungsphase und der Entsorgungsphase hat neben dem schwimmenden Zementestrich die EPS-Hartschaumdämmung. Da der Fußbodenaufbau F02 im Hochwasserfall fast vollständig rückgebaut werden muss, fallen die energieintensive Herstellung und die hohen Werte bei der Entsorgung stark ins Gewicht. Beim fossilen Energiebedarf weist die Variante F02 sowohl in der Herstellungsphase als auch unter Berücksichtigung der Entsorgung geringere Werte auf als die Varianten F03 und F04. Dies liegt insbesondere am hohen Primärenergiebedarf der Schaumglasdämmung und des Heißbitumenklebers.

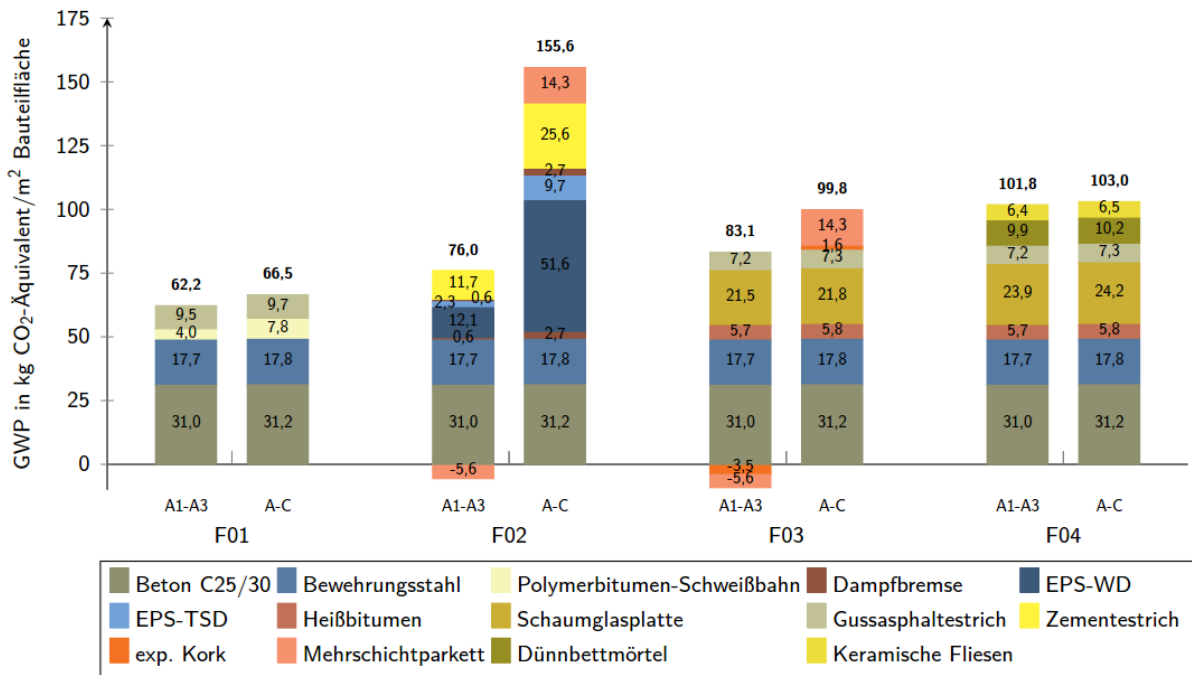


Abbildung 109: GWP Fußboden, gedämmt, in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

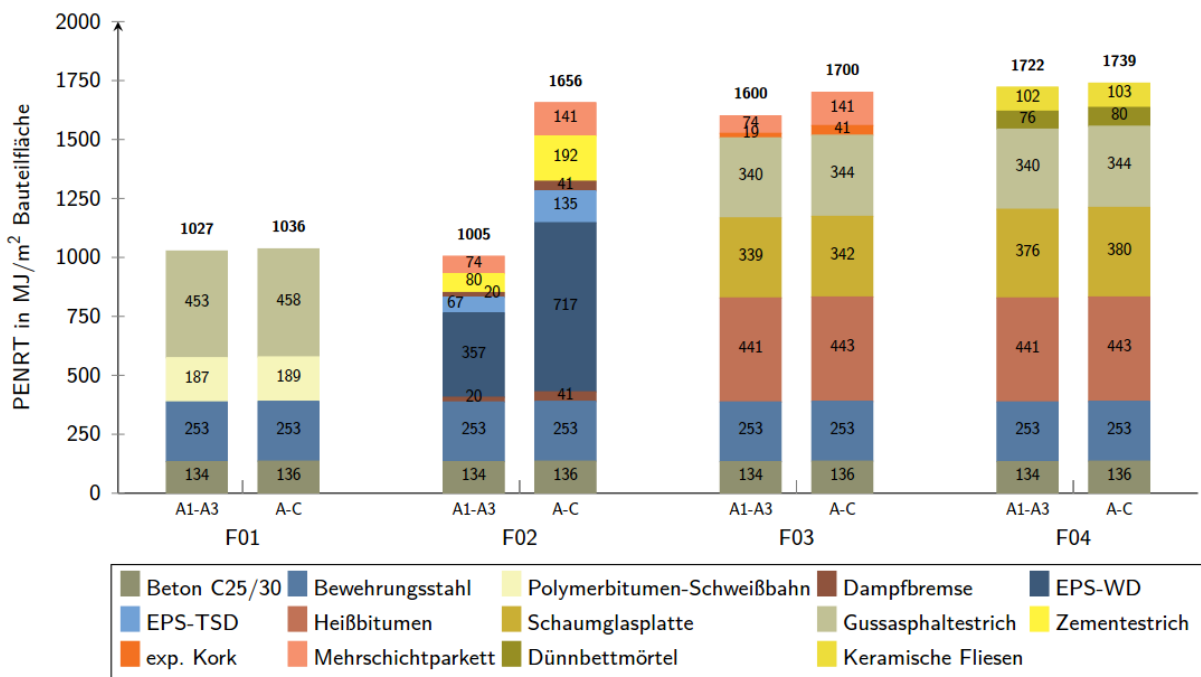


Abbildung 110: PENRT Fußboden, gedämmt, in MJ/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

Beim Vergleich der Ergebnisse der Varianten F03 und F04 zeigt sich, dass die Variante F04 bei Betrachtung der Phasen A - C die höheren Werte in der Herstellungsphase nahezu ausgleicht. Das Treibhauspotential in den Modulen A1 - A3 der Variante F03 beträgt unter Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Gutschriften ungefähr 75 % des Werts der Variante F04. Positiv wirken sich die Korkdämmung und das Mehrschichtparkett aus. Beim fossilen Energieverbrauch steigt der Wert der Variante F03 von 93 % in der Herstellungsphase auf 98 % bei den Phasen A - C auf den Wert der Variante F04 an.

Im Vergleich mit der ungedämmten Variante zeigt sich deutlich der Einfluss der Dämmung. Die Ökobilanzergebnisse für die ungedämmten Varianten können der Abbildung 111 und der Abbildung 112 entnommen werden. Zwar weist beim Treibhauspotential weiterhin die Variante F02 die höchsten Werte auf. Allerdings ist die Differenz zwischen der Variante F04 und der Variante F02 deutlich geringer als bei der gedämmten Ausführung. Dies liegt hauptsächlich daran, dass auf die EPS-Dämmung verzichtet wird. Weiterhin wird bei den Varianten F03 und F04 zwischen Stahlbeton und Gussasphaltestrich eine Bitumen-Schweißbahn verarbeitet. Dies hat einen nachteiligen Einfluss auf die Bilanzierungsergebnisse beider Varianten. Bei Betrachtung der Wirkungskategorie PENRT nehmen die Werte für die Varianten F03 und F04 im Vergleich zur gedämmten Variante deutlich ab und nähern sich dem Wert der Variante F01 an.

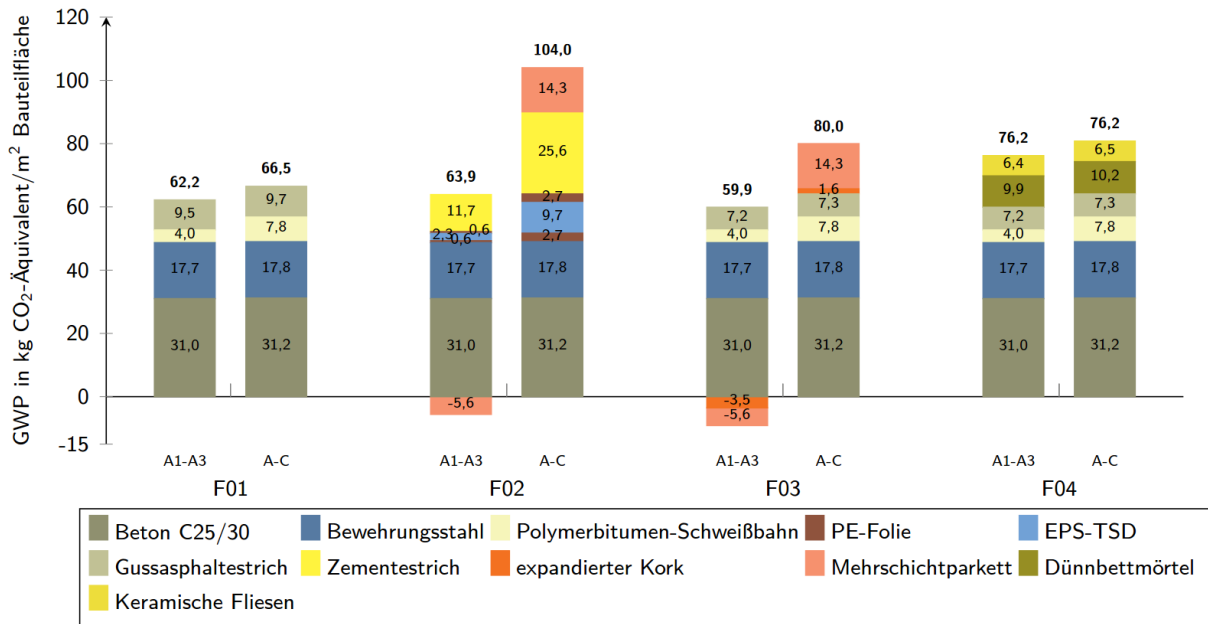


Abbildung 111: GWP Fußboden, ungedämmt, in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

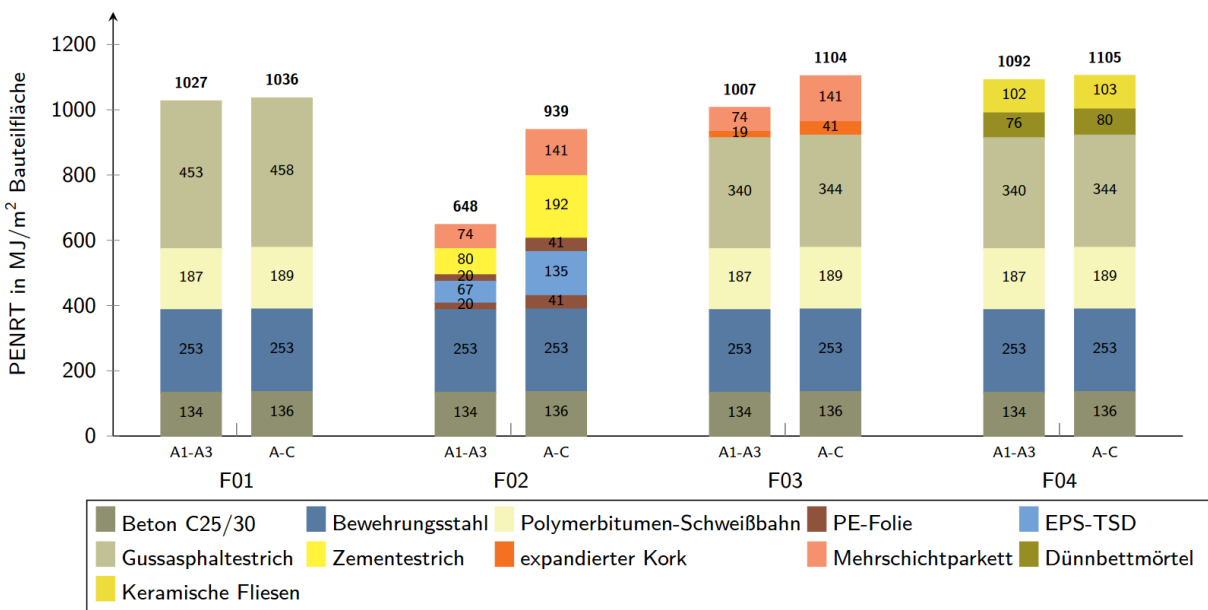


Abbildung 112: PENRT Fußboden, ungedämmt, in MJ/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

## Rückbaubarkeit

Für die Fußbodenvarianten wird die tragende Stahlbetondecke in der Bewertung nicht berücksichtigt. Dies liegt, wie bereits erwähnt, daran, dass der Massenanteil der Stahlbetondecke einen zu großen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Weiterhin ist die Stahlbetondecke bei allen untersuchten Varianten identisch, sodass an dieser Stelle eine Vernachlässigung gerechtfertigt erscheint. Die Ergebnisse der gewichteten Recyclingfaktoren können der Tabelle 69 entnommen werden. Für die gedämmte Variante zeigt sich, dass die gegen Hochwasser nicht resistente Variante F02 den höchsten Recyclingfaktor aufweist. Dies liegt unter anderem daran, dass die einzelnen Schichten leicht trennbar sind. Dies bedeutet auch, dass der Aufwand zum Rückbau der einzelnen Schichten im Hochwasserfall vergleichsweise niedrig ist. Der Recyclingfaktor der Variante F01 ist aufgrund des geringen Aufwands für den Rückbau ähnlich hoch wie für die Variante F02. Gussasphalt weist ein hohes Rückbaupotential auf und bietet darüber hinaus noch Möglichkeiten im Hinblick auf die Wiederverwertbarkeit (Hillebrandt et al. 2018). Das Ergebnis der Varianten F03 und F04 weicht deutlich vom gewichteten Recyclingfaktor der Varianten F01 und F02 ab. Dies liegt zu großen Teilen an dem nachteiligen Einfluss der in Heißbitumen verlegten Schaumglasdämmung. Der Recyclingfaktor der Variante F03 ist dabei noch etwas höher, da der Bodenbelag und die Trittschalldämmung leichter rückbaubar sind als die Fliesen der Variante F04.

Der Einfluss der Dämmung zeigt sich beim Vergleich mit der Betrachtung der ungedämmten Fußbodenvarianten. Der Wert der Variante F02 erhöht sich unwesentlich. Zwar wird auf die EPS-Dämmung verzichtet, der Anteil der Masse der Dämmung im Vergleich zur Gesamtmasse des Bauteils ist jedoch sehr gering. Deutlicher wird die Erhöhung des Recyclingfaktors der Varianten F03 und F04 in der ungedämmten Ausführung. Die ungedämmte Variante F03 hat einen ähnlichen Recyclingfaktor wie die Varianten F02 und F01. Dies zeigt den negativen Einfluss der verklebten Schaumglasdämmung auf die Rückbaubarkeit. Für die Variante F04 ist die Zunahme des Recyclingfaktors nicht ganz so hoch, da die Fliesen weiterhin mit größerem Aufwand rückgebaut werden müssen als das Mehrschichtparkett.

Tabelle 69: Recyclingfaktoren der Fußbodenaufbauten

Variante	Recyclingfaktor R	
	Ausführung	
F01	-	69,64
F02	70,31	70,86
F03	62,33	70,56
F04	60,69	65,98

## 7.5.6. Außenwand

Es werden die folgenden Varianten untersucht:

- AW01 - Wärmedämmverbundsystem (WDVS),
- AW02 - Zweischaliges Mauerwerk,
- AW03 - Vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF),
- AW04 - Zweischaliges Mauerwerk, begrünt.

## AW01 - Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

Der Aufbau der Variante AW01 ist der Standardaufbau, wie er aus den Plänen der Musterliegenschaft in Kapitel 3 entnommen werden kann. Der Aufbau sieht eine Kalksandsteinwand mit einem Wärmedämmverbundsystem vor. Als Dämmstoff wird eine Hartschaumdämmung aus EPS mit Kalk-Zement-Putz verwendet. Der Schichtenaufbau für die Variante AW01 ist in Abbildung 113 sowie der Tabelle 70 dargestellt.

Die Variante AW01 ist bis zu einer Höhe von 0,72 m von der Einwirkung Hochwasser gefährdet. Diese Höhe entspricht der Wasserstandshöhe der Expositionsklasse 3. Zusätzlich zur Betrachtung des Wasserstandes ist die kapillare Feuchtigkeit zu berücksichtigen. Durch die Kapillarfunktion der Baustoffe kann die Feuchtigkeit bis zu 50 cm über die eigentliche Wasserstandshöhe ansteigen (BMI 2018a). Somit muss eine hochwasserfeste Ausführung bis zu einer Höhe von 1,22 m verwendet werden. Da die Putzschicht aufgrund ihrer Materialzusammensetzung nicht wasserundurchlässig ausgeführt werden kann, kann das Wasser in die Dämmebene gelangen und diese beschädigen. Die verwendete EPS-Hartschaumdämmung weist eine hohe Resilienz gegen kurzzeitige Feuchteinwirkungen auf, da sie nur geringe Wassermengen aufnimmt. Unter langfristiger Feuchteinwirkung wie bei Hochwasser können aber auch bei diesem Material schwere Schäden infolge von Feuchte auftreten.

Um in einem solchen Fall der Schimmelbildung vorzubeugen und die Funktionalität aufrechtzuerhalten, müsste der Dämmstoff entweder getrocknet oder rückgebaut werden. Zur Beschleunigung des Trocknungsvorgangs sollte die Putzschicht entfernt werden (BMI 2018a). Eine weitere Möglichkeit ist der Austausch der beschädigten Bauteile. Aufgrund der geklebten Verbindung der Wärmedämmung mit dem Mauerwerk ist ein sortenreiner Rückbau jedoch nur mit hohem zeitlichem Aufwand möglich (Albrecht/Schwitalla 2015). Um einen Austausch der Materialien nach Hochwasserereignissen zu vermeiden, kann Schaumglas verwendet werden, welches eine hohe Resilienz gegenüber Wasser aufweist. Für die Variante AW01 werden bis zum maximalen Bemessungshochwasserstand Schaumglasplatten verwendet. Oberhalb des Bemessungshochwasserstandes von 1,22 m kann ein anderer Dämmstoff verwendet werden, der im Vergleich zu EPS und Schaumglas eine bessere Ökobilanz aufweist. Der Dämmstoff muss jedoch denselben Wärmedurchlasswiderstand haben, um Versprünge in der Fassade zu vermeiden. Eine Möglichkeit für den Bereich, der nicht vom Hochwasser betroffen ist, ist die Verwendung von Mineralwolle, wobei auch hier die Entsorgung und Wiederverwertung aufgrund der Verunreinigung durch Klebstoffe aufgrund der Verunreinigung und nicht sortenreinen Trennung der Bauteile problematisch ist (IBO 2018). Um den Unterschied zwischen einer gegenüber Hochwasser resilienten Ausführung und einer nicht resilienten Ausführung aufzuzeigen, wird im weiteren Verlauf auch eine vollständige Ausführung der Variante AW01 mit Mineralwolle untersucht.

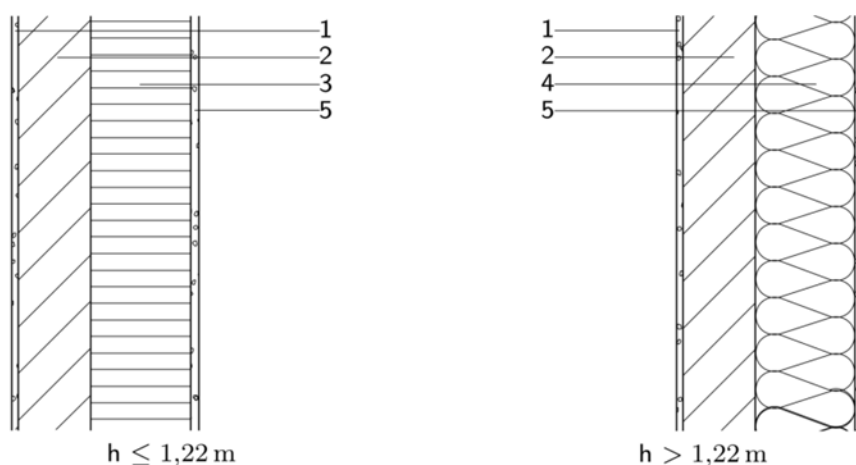


Abbildung 113: Bauteilaufbau AW01 - Wärmedämmverbundsystem

Tabelle 70: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante AW01

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Kalk-Innenputz	1,5
2	Kalksandstein	17,5
3	Schaumglasplatte in Heißbitumen	24,0
4	Mineralwolle mit Klebemörtel	24,0
5	Kalk-Zement-Putz	2,0

### AW02 - Zweischaliges Mauerwerk mit Kerndämmung

Im Hinblick auf eine Anpassung der Außenwandkonstruktion und die zusätzliche Erschließung von Klima- und Umweltpotentialen wird die Variante AW01 weiterentwickelt. In einem ersten Anpassungsschritt wird die geklebte Verbindung des WDVS durch ein zweischaliges Mauerwerk mit Kerndämmung ersetzt, das unter anderem bessere Eigenschaften im Hinblick auf die Rückbaubarkeit aufweist. Der Bauteilaufbau der Variante AW02 ist in Abbildung 114 und der Tabelle 71 dargestellt. Das Grundprinzip des zweischaligen Mauerwerks ist die Trennung der tragenden Ebene von der bewitterten Fassade. Die tragende Ebene wird auch innere Tragschale genannt, die vorgemauerte Fassade ist die Verblendschale. Der Abstand zwischen den Schalen wird in diesem Fall vollständig mit einer Kerndämmung gefüllt. Eine nur teilweise Dämmung des Schalenzwischenraums ist auch möglich.

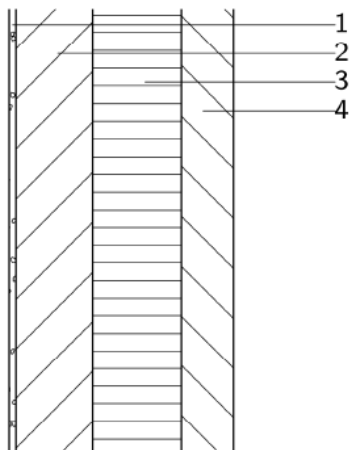


Abbildung 114: Bauteilaufbau der Variante AW02 - Zweischaliges Mauerwerk

Tabelle 71: Schichtenfolge und Schichtdicken der Variante AW02

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Kalk-Innenputz	1,5
2	Kalksandstein	17,5
3	Schaumglasplatte	20,0
4	Klinker	12,0



Allerdings darf der lichte Abstand der Mauerwerksschalen nach DIN EN 1996-2/NA:2012-01 nur 15 cm betragen, es sei denn die verbindenden Drahtanker sind auf größere Abstände zugelassen. Die Zulassung der meisten Anker beträgt derzeit bis zu 20 cm, sodass die Abweichung von der Vorgabe der Norm zulässig ist (Altaha 2012). Die Anzahl der Anker richtet sich nach der Windzone, in der sich das Gebäude befindet. Da das Gebäude der Windzone 2 (Binnenland) zugeordnet wird und niedriger als 10 m ist, sind fünf Anker pro m<sup>2</sup> ausreichend.

Bei kleineren Gebäuden, wie im Falle der Musterliegenschaft, kann aufgrund der geringen Gebäudehöhen und der dadurch reduzierten Bauleranzen der gesamte Abstand mit Wärmedämmung verfüllt werden. Somit ist allerdings zwischen der Dämmung und der Außenschale kein Luftspalt mehr vorhanden. Der Luftspalt hat die Funktion der Wasserabführung von eindringendem Regen- oder Kondenswasser. Da diese Funktion mit einer vollständigen Kerndämmung entfällt, muss das Dämmmaterial dauerhaft wasserfest sein. Durch die Verwendung einer Kerndämmung kann auf eine Windsperre verzichtet werden. Weiterhin müssen keine gesonderten Maßnahmen für den Schutz vor Insekten oder kleinen Nagetieren vorgenommen werden (IBO 2018). In die Verblendschale können offene Stoßfugen eingebaut werden, um die Luftströmung zu unterstützen. Die Verwendung von offenen Stoßfugen ist jedoch nicht normativ geregelt und muss je nach Projekt beurteilt werden (Altaha 2015).

Die Konstruktion AW02 weist durch die Verblendschale eine hohe Resilienz gegenüber Schlagregen und Hagel auf. Um das Eindringen von Niederschlagswasser in den Schalenzwischenraum auf ein Minimum zu reduzieren, ist die Verwendung von schwach saugenden Mauersteinen in der Vorsatzschale vorteilhaft. Für die Ausführung der äußeren Schale können Klinkersteine oder Mauerziegel verwendet werden. Voraussetzung ist, dass die Steine ein geringes Porenvolumen und damit eine geringe Wasseraufnahmekapazität aufweisen. Gleichzeitig können optische Beeinträchtigungen sowie biologische Besiedelung durch erhöhte Feuchtigkeit vermieden werden. Eine Schwachstelle des zweischaligen Mauerwerks in Bezug auf Schlagregen stellen die Fugen und der Mörtel dar. Im Rahmen einer Studie konnte anhand von Versuchen festgestellt werden, dass insbesondere im Bereich der Fugenkreuze ein Durchfeuchten der Verblendschale stattfindet. Weiterhin findet der hauptsächliche Transport der auftretenden Feuchte nicht über die Steinsichtflächen sondern über die Fugenflanken statt. Tritt das Wasser in das Bauteil ein, entsteht die Gefahr von „Ausblühungen“ infolge Salzkristallisation (Gigla 2015).

Gegenüber der Einwirkung Hochwasser ist die Vulnerabilität des Bauteilaufbaus erhöht. Dringt im Hochwasserfall über die kapillare Saugfähigkeit der Verblendschale Wasser in den Schalenzwischenraum ein, kann dies zu einer langfristigen Schädigung der zwischen den Schalen liegenden Dämmung führen. Die Rücktrocknung ist sehr aufwendig, da kein direkter Zugang zur Dämmung möglich ist. Feuchteempfindliche Dämmstoffe wie Mineralwolle sind für den hochwassergefährdeten Bereich ungeeignet. Ebenso ist ein teilweiser Rückbau zur Freilegung der durchfeuchteten Dämmschichten aufgrund des Verbandes der Verblendschale sehr schwer möglich. Aus diesem Grund wird empfohlen, bis zur Höhe des Hochwassers der Expositionsklasse 3 von 1,22 m wasserunempfindliche Dämmstoffe zu verwenden. Grundlegend stehen alle nach DIN 4108-10:2015-12 für die Kerndämmung (WZ) zugelassenen Dämmstoffe zur Verfügung, wenn sie die entsprechenden in Abstimmung mit dem für das Gebäude verbindlichen bauordnungsrechtlichen Vorgaben wie bspw. Brandschutz erfüllen. Da faserige Dämmstoffe eine erhöhte Vulnerabilität gegenüber Hochwasser aufweisen, entfällt ein Großteil der natürlichen Werkstoffe (Patt/Jüpner 2013). Daher wird erneut Schaumglas als nicht-brennbarer Dämmstoff verwendet. Auf diese Weise können aufwendige Trocknungs- und Rückbauarbeiten entfallen, da eindringendes Wasser über die Außenschale wieder ausdiffundieren kann. Für die Vormauerschale werden schwach saugende Klinkermauersteine verwendet. Die Vorsatzschale muss mindestens 9 cm betragen. Um einen besseren Feuchteschutz zu gewährleisten, wird die Dicke der Verblendschale jedoch auf 12 cm festgelegt.

Für die innere Schale können alle genormten und allgemein bauaufsichtlich zugelassenen Wandbaustoffe verwendet werden (Gigla 2015). Um die Weiterentwicklung von der Variante AW01 zur Variante AW02 aufzuzeigen, wird weiterhin ein Kalksandstein der Stärke 17,5 cm verwendet. Da im Hochwasserfall das Wasser auch im Innenraum des Gebäudes bis zur selben Höhe wie im Außenbereich anstehen kann, findet ein kapillarer Feuchtetransport ebenso durch die innere Schale statt. Im Hochwasserfall ist die Innenputzschicht rückzubauen, um das Entfeuchten der inneren Schale zu beschleunigen. Durch Lüften sowie Bautrocknung mit maschineller Unterstützung kann über verschiedene Verfahren der Trocknungsprozess beschleunigt werden (Alfes/Schäfers 2014). Im Bereich der Hochwassergefährdung ist zudem von einer Verwendung von Mauerwerkssteinen mit eingebauten Hohlkammern wie beispielsweise Hochlochziegel abzusehen, da sich dort eindringendes Wasser sammeln kann und den Trocknungsprozess verzögert (DWA 2016).

Da für das zweischalige Mauerwerk nur lösbare Verbindungen verwendet werden, ist ein einfacher Rückbau und eine sortenreine Trennung möglich. Weiterhin bietet die Variante eine hohe Resilienz gegenüber der Witterung und ist sehr wartungsarm. Allerdings werden bei der gemauerten Schale Werkstoffe wie Klinker verwendet. Da zum Sintern des Tons sehr hohe Temperaturen benötigt werden, ist der Herstellprozess energieintensiv. Ebenso ist der Bauteilaufbau mit bis zu 50 cm sehr massiv (Hestermann et al. 2015).

### **AW03 - Vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF)**

Um den hohen Materialaufwand eines zweischaligen Mauerwerks zu vermeiden wird die Verblendschale durch eine schlankere und materialsparendere Konstruktion ersetzt. Allein durch die damit einhergehende Ressourceneinsparung und dem damit verbundenen reduzierten fossilen Energiebedarf, kann ein weiteres Klimapotential erschlossen werden. Das Funktionsprinzip der vorgehängten hinterlüfteten Fassade (VHF) ist ähnlich zur Variante AW02. Besteht beim zweischaligen Mauerwerk die bewitterte Fassade aus einem selbst tragenden Mauerwerk, wird bei der VHF die bewitterte Ebene über Verbindungselemente und eine Unterkonstruktion an der tragenden Ebene verankert. Zwischen vorgehängter Fassade und Verankerungsgrund wird im Normalfall eine Dämmebene angebracht. Zwischen vorgehängter Fassade und Dämmebene befindet sich ein Luftspalt, der zum einen eindringendes Wasser infolge Schlagregen abführt und zugleich durch den Zirkulationseffekt Kondensationsfeuchte und anfallendes Tauwasser sowie Baufeuchte abführt. Bei der Materialwahl für die Wetterschale sind kaum Grenzen gesetzt. Maßgebend für die Bemessung sind die DIN 18516-1:2010-06 sowie die DIN 18351:2016-09. Detailliertere Ausführungen zum grundsätzlichen Aufbau einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade finden sich in Kapitel 7.4.3.

Die Einwirkung Hochwasser stellt wie für die Variante AW02 auch für die Variante AW03 eine hohe Gefährdung dar. Im Unterschied zur gemauerten Verblendschale kann das Wasser bei der VHF über Fugen zwischen den Fassadenelementen in den Luftspalt eindringen und die Dämmebene beeinträchtigen. Durch die einfache Montage der Fassadenelemente kann ein leichter Rückbau erfolgen. Dies fördert zum einen den Trocknungsprozess der Wärmedämmung und des Ankergrunds. Zum anderen kann aber auch ein feuchtempfindliches Dämmmaterial verwendet werden, welches im Hochwasserfall als eine Art Opferschicht sehr einfach rückgebaut und erneuert werden kann. Hier bieten sich Dämmstoffe an, die ohne großen Aufwand wiederverwertet werden können. Bei ausreichend großer Vorwarnzeit kann die Fassade auch bereits vor dem Eintreffen des Hochwassers demontiert werden (DWA 2016). So wird sie vor der Flut aber auch einer möglichen Gefährdung durch Schwemmstoffe oder mechanischen Beschädigung durch Treibgut geschützt. Für die Variante AW03 kann dasselbe Dämmmaterial über die gesamte Wandhöhe verwendet werden. Der Bauteilaufbau der Variante AW03 ist in der Abbildung 115 sowie der Tabelle 72 dargestellt.

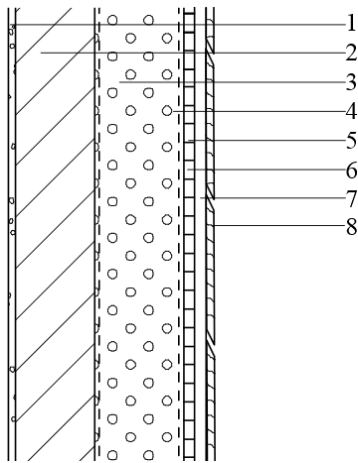


Abbildung 115: Bauteilaufbau AW03 – Vorgehängte hinterlüftete Fassade

Tabelle 72: Schichtenfolge und Schichtdicken des Außenwandaufbaus AW03

Nr.	Material	Dicke in cm
1	Kalk-Innenputz	1,5
2	Kalksandstein	17,5
3	Zelluloseflocken	20,0
4	Stahlprofil	20,0
5	Holzwolleleichtbauplatte	1,9
6	Holzlattung	2,0
7	Luftspalt	2,0
8	Holzverkleidung	2,0

Um weitere Umweltpotentiale erschließen zu können, soll an dieser Stelle neben der einfachen Rückbaubarkeit und sortenreinen Trennung zusätzlich eine Materialauswahl mit nachwachsenden Rohstoffen für Dämmung und Wetterschale im Vordergrund stehen. Als Ankergrund wird eine Kalksandsteinwand vorgesehen, während die Dämmebene mit Zellulosefaser-Dämmflocken ausgeführt wird. Zellulosefaser-Dämmflocken bieten den Vorteil, dass sie bei einer Durchfeuchtung ausgebaut, getrocknet und erneut eingeblasen werden können (IBO 2018). Um die Zellulosefaser einblasen zu können, werden auf die verzinkten Stahlprofile Holzwolle-Leichtbauplatten geschraubt. In den entstehenden Hohlraum zwischen den Stahlprofilen, dem Mauerwerk sowie den Holzwolle-Leichtbauplatten kann so die Dämmung eingeblasen werden. Zusätzlich wird auf Höhe des Wasserstandes der Expositionsklasse 3 ein horizontaler Balken umlaufend angebracht, um im Hochwasserfall nur die Einblasdämmung bis zu dieser Höhe erneuern zu müssen. Als vorgehängte Fassade werden Holzelemente verwendet, die über eine Holzunterkonstruktion mit dem Ankergrund verbunden sind. Die Abbildung 115 dient als exemplarische Darstellung einer Fassadengestaltung. Prinzipiell sind hier verschiedene Varianten denkbar. Vorteilhaft aufgrund der einfacheren Demontage sind jedoch großflächige Holzelemente. Die Unterkonstruktion erfolgt über vertikale Holzlatten. Um die Durchlüftung zu gewährleisten muss die Lattung ungefähr 2 cm über die Dämmebene hinausragen. Da dies aufgrund der massiven Holzlatten einen höheren Materialaufwand bedeuten würde, wird zwischen dem tragenden Mauerwerk und der Lattung ein verzinktes Stahlprofil angebracht, das als Abstandshalter fungiert (Hestermann et al. 2015).

## Analyse

### Lebenszyklusanalyse

Bei der Erstellung der Ökobilanzen wurde wiederum davon ausgegangen, dass innerhalb des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren ein Schadenereignis eintritt. Vergleicht man die Ergebnisse beim Treibhauspotential und beim fossilen Primärenergiegehalt für die Außenwand zeigt sich in Abbildung 116 und Abbildung 117, dass die Variante AW03 in beiden Wirkungskategorien sowohl in der Herstellungsphase als auch bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus die niedrigsten Werte aufweist. Dies ist in erster Linie auf die Verwendung von Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen wie Zellulosefaser und Holz zurückzuführen. Für das Treibhauspotential kann für beide Materialien eine CO<sub>2</sub>-Gutschrift in der Herstellungsphase angesetzt werden. Aber auch in der Nutzungs- und der Entsorgungsphase sind die ökobilanziellen Auswirkungen beider Materialien sehr gering.

Vorteilhaft wirkt sich auch aus, dass die Holzfassade durch Trocknung erneut verwendet werden kann oder im günstigsten Fall im Vorfeld des Hochwassers bereits entfernt wurde. So wird der Instandhaltungsaufwand möglichst gering gehalten. Bei Betrachtung der Variante AW01 zeigt sich, dass die Verwendung von hochwasserfesten Materialien im Hinblick auf die Ökobilanz nicht zwingend vorteilhaft ist. Zwar nähern sich sowohl beim Treibhauspotential als auch beim fossilen Primärenergiegehalt die Werte der nicht hochwasserfesten Ausführung an die Werte der hochwasserfesten Ausführung an. Für das Treibhauspotential sind die Werte der nicht hochwasserfesten Variante bei Betrachtung der Phasen A - C nahezu identisch, beim Primärenergiebedarf hingegen etwas niedriger. Dies ist insbesondere auf die energieintensive Herstellung der Schaumglasplatten im Vergleich zu Mineralwolle zurückzuführen. Die Werte in beiden untersuchten Wirkungskategorien sind für die Variante AW02 im Vergleich zu den anderen Varianten am höchsten. Der Hauptgrund dafür ist neben der erforderlichen Dämmung aus Schaumglas die vorgesezte Klinkerfassade. Wie bereits erwähnt wird Klinker bei sehr hohen Temperaturen gesintert. Die hohen Temperaturen bedeuten gleichzeitig einen sehr hohen Energiebedarf, der meistens durch fossile Brennstoffe bereitgestellt wird und sich damit negativ auf den fossilen Primärenergiegehalt auswirkt.

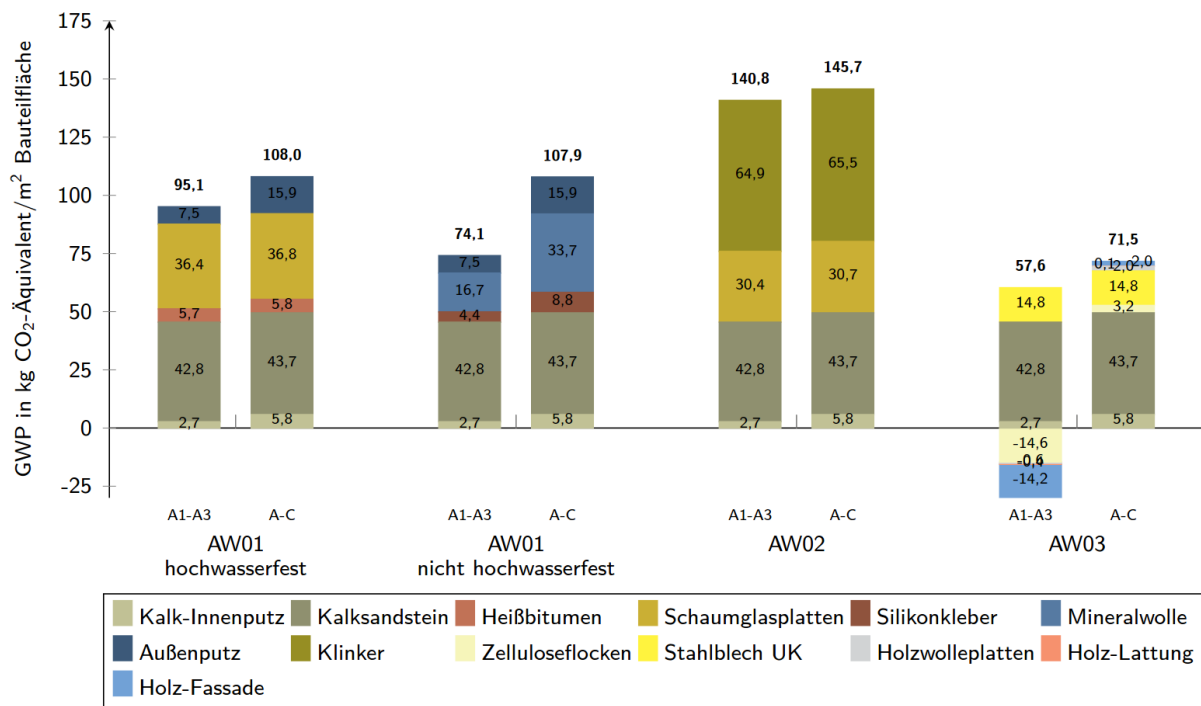


Abbildung 116: GWP Außenwand, in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/m<sup>2</sup> Bauteilfläche

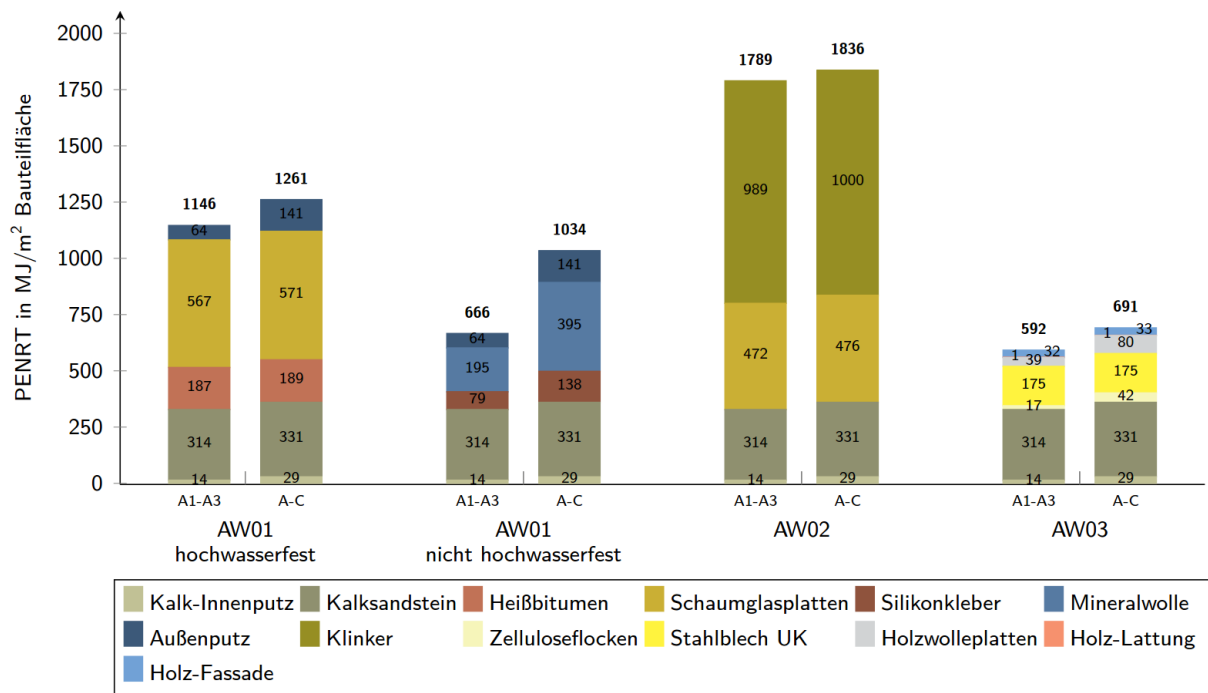


Abbildung 117: PENRT Außenwand, in MJ/m² Bauteilfläche

### Rückbaubarkeit

Für die Außenwand wird das tragende Kalksandsteinmauerwerk in der Untersuchung der Rückbaubarkeit vernachlässigt. Die Ergebnisse der Recyclingfaktoren für die einzelnen Varianten können der Tabelle 73 entnommen werden. Deutlich zeigt sich, dass der gewichtete Recyclingfaktor für die Variante AW01 mit 47,62 für die hochwasserfeste und 48,44 für die nicht hochwasserfeste Variante am niedrigsten aller untersuchten Varianten ist. Dies lässt sich auf den hohen Anteil an geklebten Verbindungen im Bauteil, beispielsweise zwischen der Dämmung und der tragenden Ebene sowie der Putzschicht und der Dämmung, zurückführen. Eine sortenreine Trennung ist somit nur schwer möglich. Die Variante AW03 erzielt den höchsten Recyclingfaktor. Grund dafür ist vor allem die gute Trennbarkeit der einzelnen Ebenen des Bauteils, das über Schraubverbindungen fast vollständig in die einzelnen Stofffraktionen rückgeführt werden kann. Weiterhin wird mit den Zellulosefasern ein Dämmstoff verwendet, der mit sehr geringem Aufwand recycelt werden kann. Zwischen der Variante AW01 und der Variante AW03 liegt die Variante AW02. Vorteilhaft ist dabei die lose Verlegung oder Befestigung der Kerndämmung über Klemmschienen mit der Unterkonstruktion. Dadurch ist eine einfache Demontage möglich. Zusätzlich ist es möglich, die einzelnen Steine der Schalen so zu demontieren, dass sie erneut verwendet werden können. Dies ist bei der Verblendschale besser möglich wie bei der Tragschale, da die Klinkersteine aufgrund ihrer geringen Porendichte leichter von der Mörtelschicht getrennt werden können (Hillebrandt et al. 2018).

Tabelle 73: Recyclingfaktoren der Außenwandaufbauten

Variante		Recyclingfaktor R
AW01	WDVS	hochwasserfest 47,62
		nicht hochwasserfest 48,44
AW02	Zweischaliges Mauerwerk	62,10
AW03	Vorgehängte hinterlüftete Fassade	74,28

### Weitere Klima- und Umweltpotentiale

Neben geringen Umweltwirkungen und der guten Rückbaubarkeit ist die Erschließung weiterer Umweltpotentiale bei der Außenwand stark von der Gestaltung der Oberfläche abhängig. Dabei kann durch eine Begrünung der Fassade insbesondere die Potentiale Mikroklima, Regenwasserrückhaltung, Feinstaubbindung und Biodiversität positiv beeinflusst werden. Detaillierte Ausführung zur Gebäudebegrünung von Fassaden insbesondere zur Pflanzenauswahl finden sich in der Für die Begrünung der Fassade sind zwei Systeme denkbar. Dies sind:

- bodengebundene Fassadenbegrünung,
- wandgebundene Fassadenbegrünung.

Bodengebundene Fassadenbegrünungen sind sehr wartungsarm und bedürfen nur geringer Pflege und keiner zusätzlichen Bewässerung. Die Ausführung kann entweder über Direktkletterer erfolgen, die an der Wand entlang wachsen, oder über einen geleiteten Bewuchs mit Gerüstkletterpflanzen. Durch die geleitete Begrünung ergeben sich eine größere Pflanzenauswahl und zusätzliche Gestaltungsmöglichkeiten, allerdings ist ein erheblich größerer Investitionsaufwand nötig. Eine Materialeinsparung durch den Ersatz einer funktionellen Ebene des Wandaufbaus ist bei bodengebundenen Systemen häufig nicht möglich, da ein vollflächiges Wachstum erst nach 3 bis 20 Jahren in Abhängigkeit der Pflanzenwahl und des Wuchses erreicht ist (Pfoser 2018). Bodengebundene, selbstkletternde Systeme sind eher für die Variante AW01 und AW02 geeignet. Insbesondere das zweischalige Mauerwerk stellt eine gute Alternative dar. Bei Verwendung eines WDV-Systems kann der Bewuchs zu einer Beschädigung der Fassade durch Wurzeln und damit zu einem ungewollten Wassereintritt führen. Die Variante AW03 ist für die bodengebundene Fassadenbegrünung nicht geeignet, da die Pflanze in die Fugen zwischen den Bauteilen wächst und dort Schäden anrichten kann.

Bei wandgebundenen Fassadenbegrünungen werden vorkultivierte Module, Behälter oder vorgehängte begrünte Flächenelemente an der Fassade befestigt oder positioniert. Durch die Vorkultivierung sind eine sofortige Flächenwirkung und damit auch die Vorteile der Fassadenbegrünung unmittelbar nutzbar. Zusätzlich steht eine erweiterte Auswahl an geeigneten Pflanzen zur Verfügung. Allerdings sind die Investitionskosten und der Wartungsaufwand bei wandgebundenen Fassadenelementen deutlich höher (Pfoser 2018). Dies liegt hauptsächlich an der Vorfertigung sowie dem erhöhten technischen Aufwand zur Wartung, Düngung und Bewässerung der Pflanzen. Für das wandgebundene System kann die vorgehängte hinterlüftete Fassade verwendet werden. Dabei können vor die Vorhangfassade bereits vorinstallierte Begrünungssysteme verwendet werden.

Die Begrünung der Fassade kann einen positiven Einfluss auf die Regenwasserrückhaltung und die Entlastung der Kanalisation haben. Eine quantitative Aussage über die Menge an zurückgehaltenem Wasser ist jedoch nur bedingt möglich, da die Rückhaltung von verschiedenen Faktoren wie beispielsweise der Blattdichte, der Intensität des Regenereignisses sowie externen Einflüssen wie Wind abhängig ist. Eine dicht bewachsene bodengebundene Grünfassade ist jedoch in der Lage, anfallendes Niederschlagswasser für mindestens 30 Minuten zurückzuhalten. Selbst dünner bewachsene Grünfassaden haben eine minimale Rückhaltedauer von 15 Minuten. Starkregenereignisse mit einer Niederschlagsmenge von über 9 l/m<sup>2</sup> in einer Stunde bei einer dicht begrünten Fassade und über 2,6 l/m<sup>2</sup> in einer Stunde bei einer dünn begrünten Fassaden führen jedoch dazu, dass nahezu kein Niederschlagswasser mehr zurückgehalten wird (Tiwary/Godsmark/Smethurst 2018). Diese Schwellenwerte liegen allerdings deutlich unter den vom DWD definierten Schwellenwerten für die Warnstufe 2 für Starkregenereignisse (s. Tabelle 3). Dadurch ist der Beitrag zur Regenwasserrückhaltung bei Starkregenereignissen deutlich geringer.

Bei Betrachtung des Mikroklimas werden für jede Variante unterschiedliche positive Effekte erzielt. Für die Variante AW01 kann durch die Verwendung von hellen Putzen ein höherer Reflexionsgrad der Wärmestrahlung im Vergleich zu dunklen Oberflächen erreicht werden. Durch die höhere Albedo wärmen sich die Oberflächen des Bauteils nicht so stark auf, was sich positiv auf die Umgebungstemperatur auswirkt. Die Variante AW02 schafft durch die vorgemauerte Fassade eine hohe thermische Speicherkapazität. Dies kann zu erhöhten Temperaturen im Umfeld der Fassade führen. Die Variante AW03 hat durch die Holzfassade eine geringe thermische Speicherkapazität. Durch die Hinterlüftung wird die Wärme nach oben abgeführt, sodass es zu keinem Wärmestau kommt. Die begrünte Fassade beeinflusst das Mikroklima positiv. Durch die Begrünung kann die lokale Lufttemperatur im Vergleich zu unbegrünten Fassaden um bis zu 0,8 °C reduziert werden (Pfoser 2018). Durch die Verdunstung an der Fassade wird die Umgebungsluft gekühlt und das Innenraumklima verbessert. Die Verdunstung der Fassadenbegrünung trägt weiterhin auch dazu bei, dass der „kleine Wasserkreislauf von Landoberflächen“ am Leben erhalten wird, der einer der Hauptverantwortlichen für lokalen Niederschlag ist (ebd.). Nähere Ausführungen zur Fassadenbegrünungen und den Auswirkungen auf das Mikroklima finden sich in den Kapiteln 9.3.3 und 9.4.3.

Auch für das Umweltpotential Biodiversität ist der Einfluss der Varianten AW01, AW02 und AW03 zu vernachlässigen. Die Schaffung von Lebensraum wäre dabei teilweise möglich, allerdings kann beispielsweise die Ansiedelung von Insekten zu schwerwiegenden Schädigungen der Konstruktion und damit zu einem Verlust der Funktionsfähigkeit führen. Einzig die Variante AW04 trägt über die begrünte Fassade dazu bei, zusätzlichen Nahrungs- und Lebensraum für Insekten, Vögel und Pflanzen zu schaffen. Die Bindung und die Absorption von Feinstaub sind ebenso hauptsächlich bei der Variante AW04 möglich. Die Pflanzenauswahl spielt für den Umgang mit Feinstaub eine große Rolle. Viele in der Fassadenbegrünung verwendete Pflanzen sind zwar in der Lage, Feinstaub auf den Blattoberflächen anzureichern. Allerdings wird der Feinstaub nicht eingelagert, so dass im Falle eines Starkregens der Feinstaub wieder abgespült wird. Durch die Anlagerung kumulieren sich jedoch die Partikel und erreichen Korngrößen, in denen sie nur noch einen geringen Einfluss auf die Gesundheit haben. Moose besitzen im Unterschied zu höheren Pflanzen einen erhöhten Blattoberflächenmittelwert. Dadurch haben sie eine größere Fläche um Feinstaub abzuscheiden. Moose und Flechten sind weiterhin in der Lage, durch biologische Prozesse auf der Blattoberfläche angelagerten Feinstaub in den Zellen zu absorbieren. Detailliertere Ausführungen zur Begrünung von Fassaden und der Auswirkungen auf Biodiversität und Feinstaubbindung finden sich in Kapitel 8.5.3.

## 7.6. Hagel

Von Hagel können prinzipiell nur Bauteilschichten direkt betroffen sein, die der Witterung unmittelbar ausgesetzt sind. Besonders gefährdet sind die folgenden Bauteile (von hoher Sensitivität zu niedriger):

- Raffstores und Rollläden,
- Lichtkuppeln,
- Dach,
- Fassade,
- Photovoltaik-Module,
- Solarthermische Kollektoren.

Werden äußere Bauteilschichten beschädigt, die dem Schutz gegen Niederschlagswasser dienen, besteht die Gefahr hoher Folgeschäden, insbesondere wenn der Ausgangsschaden unentdeckt bleibt. Dringt durch eine undicht gewordene Stelle der Gebäudehülle über längere Zeit Niederschlagswasser ein, dann können die dahinterliegenden Bauteilschichten durch das eindringende Regenwasser beschädigt werden. Der entstehende Feuchteschaden kann den Ursprungsschaden bei weitem übertreffen.

In Deutschland existiert keine produktübergreifende Norm zur Prüfung von Bauteilen gegen Hagelschlag. In der Planungspraxis wird die Einwirkung Hagel bisher kaum berücksichtigt. Eine planmäßige Bemessung von Bauteilen gegenüber der Einwirkung Hagel bzw. eine Nachweisführung zum Hagelwiderstand der Außenbauteile oder zur Schadenprävention ist nicht vorgeschrieben und es ist auch keine standardisierte, einheitliche Vorgehensweise etabliert. Nichtsdestotrotz existieren beispielsweise gesetzliche Regelungen für einzelne Materialien wie beispielsweise für Dachdichtungsbahnen (DIN EN 13583:2012-10). Dementsprechend ist es dem Bauherrn zu empfehlen, von den beauftragten Planern entsprechende Betrachtungen einzufordern.

Die Vereinigung Kantonaler Gebäudeversicherungen entwickelte einheitliche, produktneutrale Prüfbestimmungen für die Ermittlung des Hagelwiderstandes (VKF 2018a). Die Allgemeinen Prüfbestimmungen werden durch bauteilspezifische Bestimmungen für 35 verschiedene Bauteile ergänzt (VKF 2019). In den bauteilspezifischen Prüfbestimmungen werden insbesondere Vorgaben zum Versuchsaufbau, zur Vorlagerung, Vorbehandlung und den Beschusssorten sowie Beschusswinkeln der Probekörper gemacht. Die Prüfungen erfolgen prinzipiell mit künstlich hergestellten Kugeln oder Spezialprojektilen aus Laboreis. Der minimale Durchmesser der Laboreiskugel beträgt 10 mm und kann in 10 mm-Schritten vergrößert werden, bis zu einem maximalen Durchmesser der Laboreiskugel von 80 mm. Für jede Größe von Laboreiskugel sind Grenzwerte für die Masse, für die Beschussgeschwindigkeit entsprechend der zu erwartenden Geschwindigkeit beim freien Fall und für die kinetische Energie beim Aufprall vorgegeben. Diese Randbedingungen müssen für eine konforme Prüfung eingehalten werden.

Die größtmögliche Eiskugel, bei der das untersuchte Bauteil schadenfrei bleibt, definiert die zugehörige Hagelwiderstandsklasse. Beispielsweise übersteht ein Bauteil der Hagelwiderstandsklasse HW 3 den Aufprall eines Hagelkorns mit einem Durchmesser von 30 mm unbeschadet. Nach den aktuellen VKF Prüfbestimmungen existieren nur die Hagelwiderstandsklassen HW 1 bis HW 5 (Hagelregister 1. 12. 2018). Wird ein Bauteil zusätzlich mit größeren Projektilen der Durchmesser 60 mm, 70 mm und 80 mm erfolgreich geprüft, kann dies auf dem Anerkennungsdocument vermerkt werden, das Produkt fällt jedoch offiziell in die Hagelwiderstandsklasse HW 5.

Die Ergebnisse der Hagelwiderstandsprüfungen und die zugehörigen Anerkennungen sind online im Hagelregister öffentlich zugänglich (VKG 2019). Dadurch ist es Bauherren und Planern möglich sich über hagelgeprüfte Bauteile und deren Widerstandsfähigkeit zu informieren.

### 7.6.1. Raffstore und Rollläden

Im Regelfall weisen Raffstore und Rollläden ohne spezielle Hagelprüfung einen Hagelwiderstand von HW 1 auf. Das bedeutet ein Hagelkorn mit einem Durchmesser von 1 cm führt noch zu keinem Schaden. Darüber ist zunächst mit optischen Beeinträchtigungen durch Dellen bis hin zum Funktionsausfall zu rechnen. Heutzutage übliche 4 mm dicke Floatglasscheiben, aus denen Mehrscheiben-Isolierverglasungen für Neubauten hergestellt werden, haben einen Hagelwiderstand von HW5. Wird für die äußere Scheibe der Isolierverglasung ein 6 mm dickes Floatglas verwendet führt sogar der Aufprall eines Hagelkorns mit 8 cm Durchmesser zu keinem Schaden. Somit sind in aller Regel außenliegende Sonnenschutzsysteme und Rollläden wesentlich schadenanfälliger als die dahinterliegenden Verglasungen. Das bedeutet, im Falle eines Unwetters sollten die schadenanfälligeren Raffstores und Rollläden unbedingt eingefahren und somit der möglichen Hageleinwirkung entzogen werden.

Um auch tagsüber bei Abwesenheit der Nutzer eine Aufheizung des Gebäudes durch die Sonneneinstrahlung über Fensterflächen zu vermeiden, sollten außenliegende Sonnenschutzsysteme oder Rollläden geschlossen werden. Hierbei besteht allerdings die Gefahr eines Schadens durch Hagel oder Wind. Aus diesem Grund ist eine Automatisierung über Windsensoren empfehlenswert. Dies ist eine Maßnahme, die für drei Einwirkungen Vorteile bietet: Sommerhitze, Sturm und Hagel.



Da starke Hagelereignisse mit heftigen Gewittern einhergehen, ist mit entsprechenden Windböen zu rechnen. Wurden windstabile Raffstores gewählt und dementsprechend hohe Windgrenzwerte programmiert, empfiehlt sich eine Kombination mit Strahlungs- oder Regensensoren. Entsprechende Sensoren werden in der Regel keinen Hagelprüfungen unterzogen. Deshalb sollten die Sensoren an Stellen montiert werden, die leicht zugänglich sind. Dies ermöglicht eine einfache Sichtprüfung im Anschluss an Hagelereignisse sowie unkomplizierte Wartungsarbeiten.

### 7.6.2. Lichtkuppeln und Dachoberlichter

Lichtkuppeln, Lichtbänder und Dachflächen sind die Bauteile eines Gebäudes, die der Einwirkung Hagel am stärksten ausgesetzt sind. Zudem führt ein Schaden an diesen Bauteilen durch ein Hagelereignis je nach Reaktionszeit zu erheblichen Folgeschäden infolge des Regenwassereintrags. Lichtkuppeln und Lichtbänder sind bei Flachdächern eine häufig genutzte Möglichkeit, um die Tageslichtverfügbarkeit im Gebäudeinneren zu erhöhen. Sowohl für Lichtkuppeln als auch für Lichtbänder sind im Hagelregister Bauteile mit der Hagelwiderstandsklasse HW5 verfügbar. Je nach Hagelgefährdung können daher entsprechende Bauteile verwendet werden. Unterschiede liegen im verwendeten Material und der Materialdicke. Polycarbonat (Makrolon) weist im Allgemeinen eine höhere Hagelwiderstandsfähigkeit auf als Polymethylmethacrylat (Acrylglas), allerdings ist bei der Montage mit höheren Kosten zu rechnen. Weiterhin kann über eine Erhöhung der Schichtdicke oder eine erhöhte Schichtanzahl die Hagelwiderstandsfähigkeit verbessert werden. Analog dazu sind Lichtbänder zu betrachten. Mit zunehmendem Alter und UV-Einstrahlung unterliegen Kunststoffe in der Regel einer Versprödung. Die Hersteller von Kunststofflichtkuppeln mit hoher Hagelwiderstandsklasse treffen keine Aussage zum erreichten Hagelwiderstand nach mehrjähriger Bewitterung. Unter Umständen ist bezüglich der Langzeitstabilität die Verwendung von Glasoberlichtern, bei denen die obere Verglasungsebene aus Einscheibensicherheitsglas (ESG) oder Verbundsicherheitsglas (VSG) besteht, zu bevorzugen.

### 7.6.3. Dächer

Steildächer werden im Wohnungsbau in der Regel mit Dachziegeln oder Betondachsteinen gedeckt. Im Hagelregister sind zahlreiche Dachziegel und Betondachsteine gelistet, die einen Hagelwiderstand von HW 4 oder höher erreichen. Es existieren sogar Produkte, die erfolgreich mit Eiskugeln mit einem Durchmesser von 6 cm getestet wurden. Die Hagelwiderstandsprüfungen von Dachziegeln und Dachsteinen werden in der Regel mit und ohne Sturmklammern durchgeführt, sodass der ermittelte Hagelwiderstand unabhängig von der Verwendung von Sturmklammern gültig ist. Damit ist eine Anpassung an zwei Klimaeinwirkungen gleichzeitig möglich. Bei Flachdächern gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten, um auf die Gefährdung durch die Einwirkung Hagel zu reagieren. Von entscheidender Bedeutung ist es die Abdichtungsebene des Flachdachs schadensfrei zu halten. Dabei existieren zwei grundsätzliche Varianten. Zum einen kann eine freiliegende Dachabdichtung mit hoher Hagelwiderstandsklasse verwendet werden, zum anderen kann die Abdichtungsebene der Einwirkung entzogen werden, indem sie unter Schutzschichten angeordnet wird. Bei einem Warmdach mit freiliegender Abdichtungsbahn ist die Anzahl der konstruktiven Schichten auf das absolut notwendige Minimum reduziert. Dadurch wird die Auflast auf das Tragwerk gering gehalten und dieses kann kleiner dimensioniert werden. Ein geringer Materialbedarf beim Tragwerk und beim konstruktiven Aufbau wirkt sich in Verbindung mit der Wahl ökologischer Baustoffe positiv auf die Ökobilanz des Bauteils Flachdach aus. Dies ist auch im Sinne des sparsamen Umgangs mit natürlichen Ressourcen und für das Ziel, die zur Herstellung eines Gebäudes benötigte Graue Energie zu reduzieren, ein wesentlicher Vorteil. Des Weiteren ist es möglich Flachdächer als Warmdach mit Bekiesung, als Umkehrdach oder als Gründach auszuführen. In allen drei Fällen ist die Abdichtungsbahn der Einwirkung Hagel komplett entzogen. Die kinetische Energie durch den Aufprall eines Hagelkorns wird in Verformungsenergie durch das Zerschlagen des Hagelkorns, eventuell in Verformungsenergie der Erdschicht des Gründachs und in Wärmeenergie umgewandelt. Bei ausreichender Dicke der Deckschichten ist die auf die Dachbahn übertragene Energie ausreichend klein, sodass kein Schaden entsteht.

Dachabdichtungsbahnen werden zur Bestimmung des Widerstands gegen Hagelschlag in Europa nach DIN EN 13583:2012-10 geprüft. Die Prüfbedingungen und Anforderungen weichen von den VKF Prüfbestimmungen, auf denen das Hagelregister und die Einteilung in Hagelwiderstandsklassen basieren, teilweise erheblich ab. Nach ebd. wird der Widerstand gegen Hagelschlag einer Dachabdichtungsbahn bestimmt, indem die Oberfläche des Prüfkörpers mit einer normierten Kunststoffkugel aus Polyamid mit einer Masse von 38,5 g ( $\pm 0,5$  g) und einem Durchmesser von 40,0 mm ( $\pm 0,5$  mm) beschossen wird. Der Widerstand gegen Hagelschlag wird als Schädigungsgeschwindigkeit der Kugel ausgedrückt, die bei höchstens einem von fünf beschossenen Probekörpern zu einer Perforation geführt hat. Der VKF Beschluss Nr. A (VKF 2018a) ordnet verschiedenen Schädigungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des bei der Prüfung verwendeten Untergrunds (harte oder weiche Unterlage) einer Hagelwiderstandsklasse zu. Dabei wird auf die SN 564271 SIA 271:2007 verwiesen. Die unterschiedlichen Klassen a, b und c definieren nach ebd.: Tabelle 7) lediglich unterschiedliche Schädigungsgeschwindigkeiten. Da die Schädigungsgeschwindigkeiten in der Tabelle von VKF (2018) bereits enthalten sind, ist die Klasseneinteilung in a, b und c nicht von Bedeutung. Das bedeutet, selbst für Produkte, die nicht im Hagelregister gelistet sind, kann bei Vorliegen entsprechender Prüfergebnisse auf eine Hagelwiderstandsklasse geschlossen werden.

Bei freiliegenden Abdichtungsbahnen ist besonders auf die Hagelwiderstandsklasse zu achten, da schon kleine Beschädigungen durch den Aufprall von Hagelkörnern zum Eindringen von Wasser und zum Durchfeuchten der gesamten Konstruktion führen können. In diesen Fällen besteht die Gefahr, dass der Initialschaden (Beschädigung der Dachbahn) unerkannt bleibt und erst ein wesentlich später auftretender Feuchteschaden, der dann umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen nach sich zieht, entdeckt wird. Es existieren Polymerbitumenbahnen und Kunststoffdachbahnen für Flachdächer, die die höchste Hagelwiderstandsklasse 5 erfüllen. Anstelle einer besonders hagelwiderstandsfähigen Dachabdichtungsbahn kann auch ein Oberflächenschutz beispielsweise aus Kies vorgesehen werden. Dadurch wird auf die Dachdichtungsbahn der Einwirkung Hagel entzogen.

Ein zusätzlicher Schutz für die Dachabdichtungsbahn gegenüber der Einwirkung Hagel kann durch die Wahl eines Umkehrdachs erreicht werden. Dabei wird die Dachabdichtungsbahn unmittelbar auf die Unterkonstruktion, also klassischer Weise die Stahlbetondachdecke, und unterhalb der Wärmedämmung aufgebracht. Als Dämmmaterial kommt in diesem Fall nur extrudierter Polystyrol-Hartschaum in Betracht, da dieser einen vollständig geschlossenen Porenaufbau aufweist und somit kein Wasser aufnimmt (Hestermann/Rongen 2018: 311). Schaumglas ist in diesem Fall ungeeignet, da es an der Oberfläche über angeschnittene Poren verfügt, in die Wasser eindringen kann. Dadurch kann bei Frost das Gefüge langsam zerstört werden (Hillebrandt et al. 2018: 50). Zur Sicherung gegen Windsog und Aufschwimmen wird die Dämmebene mit einer Kiesschüttung versehen. Durch die Kiesschüttung und die Wärmedämmung ist die Abdichtungsbahn von zwei Bauteilschichten vor mechanischen Einwirkungen geschützt (Details siehe Kapitel 7.4.4). Zudem werden die Temperaturschwankungen an der Dachabdichtungsbahn reduziert.

Bei begrünten Flachdächern ist die Abdichtungsbahn ebenfalls der Einwirkung Hagel entzogen. Die Vegetationsflächen entsprechen einem schweren Oberflächenschutz. Hinzu kommt die Tatsache, dass die Temperaturschwankungen an der Dachabdichtungsbahn wesentlich reduziert werden, wodurch sich die Lebensdauer gegenüber freiliegenden Dachbahnen deutlich erhöht (Hestermann/Rongen 2018: 322). Mit einem begrünten Dachaufbau können zahlreiche Klima- und Umweltpotentiale erschlossen werden. Zum einen bewirkt das Substrat eine Regenwasserspeicherung (vergleiche Kapitel 7.4.4), wodurch das öffentliche Kanalnetz bei Regenereignissen entlastet wird. Mit der entsprechenden Pflanzenauswahl kann eine Verbesserung des Mikroklimas am Standort und des sommerlichen Wärmeschutzes in den darunterliegenden Räumen erreicht werden (vergleiche Kapitel 9.5). Ebenfalls in Abhängigkeit der Pflanzenauswahl für die Dachbegrünung kann die Biodiversität am Standort erhöht werden oder eine Feinstaubabscheidung bzw. sogar Feinstaubbindung erzielt werden (vergleiche Kapitel 8.8 und 9.4.2).

Somit können zwei Klimapotentiale (Sommerhitze und Starkregen) sowie zwei Umweltpotentiale sicher erschlossen werden (Biodiversität, Feinstaub). Gründachaufbauten lassen sich so ausführen, dass die einzelnen Bauteilschichten sortenrein getrennt werden können. Somit kann in Abhängigkeit des detaillierten Konstruktionsaufbaus und der gewählten Verbindungsmittel ein weiteres Umweltpotential nämlich die Recyclingfähigkeit erschlossen werden. Durch das erhöhte Eigengewicht des Dachaufbaus muss das Tragwerk größer dimensioniert werden. Die zusätzlich erforderlichen Bauteilschichten wie Wurzelschutzbahn, Drainageschicht, Filterschicht und Vegetationssubstrat sowie das größer dimensionierte Tragwerk führen zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch, was sich insbesondere negativ auf die zur Herstellung des Bauteils notwendige Graue Energie und somit das Ergebnis einer Ökobilanz auswirken kann.

#### 7.6.4. Außenwände

Die in Kapitel 7.1 aufgezeigten Außenwandkonstruktionen mit tragenden Wänden aus Kalksandstein oder Stahlbeton werden heutzutage sehr häufig mit Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) ausgestattet. Bei einem Hagelereignis können insbesondere Schäden am Putzsystem auftreten. Diese beeinträchtigen entweder nur das Erscheinungsbild oder sogar die Wasserdichtheit und damit die Funktionalität. In letzterem Fall droht bei weiterer Bewitterung eine Durchfeuchtung und somit Bauschäden. Auf dem Markt sind Wärmedämmverbundsysteme aus verschiedenen Dämmmaterialien erhältlich, die sehr hohe Hagelwiderstandsklassen erreichen (Tabelle 74). Die Mehrzahl der geprüften Systeme basiert auf nicht nachwachsenden Rohstoffen. Nach Recherche der Autoren existieren lediglich wenige geprüfte Systeme, die den Dämmstoff Hanf verwenden und zwei Systeme die auf Holzfasern basieren. Folglich lässt sich mit Wärmedämmverbundsystemen eine hinsichtlich der Klimaeinwirkung Hagel angepasste Bauweise realisieren. Ein besonderes Problem bei der Verwendung von Wärmedämmverbundsystemen stellt das Recycling dar. Da die stofflich sehr unterschiedlichen Komponenten eines WDVS einen festen Verbund untereinander eingehen, ist eine sortenreine Trennung nur schwer möglich. Es existieren Ansätze zur Trennung der Komponenten durch Abschälen, Thermische Trennung oder Abfräsen. Diese befinden sich aber noch im Forschungsstadium. Der standardmäßige Verwertungsweg von Wärmedämmverbundsystemen ist aktuell die energetische Verwertung in kommunalen Müllverbrennungsanlagen (Albrecht/Schwitalla 2015: 81). Das Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es Abfälle als Sekundärrohstoff in den Produktionskreislauf zurückzuführen und wieder dasselbe Material in der ursprünglichen Qualität daraus herzustellen. Dadurch sollen die in begrenzter Menge verfügbaren Primärrohstoffe geschützt und Energie zu deren Aufbereitung eingespart werden.

Tabelle 74: Im Hagelregister enthaltene WDVS-Systeme mit in Abhängigkeit des Dämmmaterials erzielten Hagelwiderstandsklassen (Stand: August 2019)

Dämmmaterial	HW2	(HW3)	HW4	HW5
EPS	X	X	X	X
Mineralwolle		X	X	X
Mineralschaum		X		
PIR		X		
Hanf			X	
Holzfaser		X		

Die Verwendung hagelwiderstandsfähiger Wärmedämmverbundsysteme erzeugt zunächst keine positiven Klima- oder Umweltpotentiale. Die Farbauswahl des Außenanstrichs kann sich allerdings auf das Mikroklima in der Nähe der Fassade auswirken. Dies beeinflusst bei Fensterlüftung wiederum die Temperatur der einströmenden Luft und somit die Behaglichkeit im Innenraum. Aus dieser Betrachtungsweise heraus sind helle Fassadenanstriche zu bevorzugen. Der erhöhte Reflexionsgrad heller Fassadenanstriche kann sich allerdings negativ auf den thermischen Komfort im Außenraum auswirken. Trotz der geringeren Oberflächentemperatur kann sich der thermische Stress für eine Person, die sich in der Nähe der hellen Wand aufhält erhöhen, wenn die zusätzlich auf den Körper reflektierte kurzweilige Solarstrahlung bedeutender

wird als die erhöhte Umgebungslufttemperatur und der langwellige Strahlungsaustausch mit der wärmeren, dunklen Oberfläche (Krispel et al. 2017: 38). Tatsächlich ist dies bei hellen horizontalen Oberflächen jedoch deutlich wahrscheinlicher, als bei hellen vertikalen Oberflächen. Bei hohem Sonnenstand muss sich die Person entweder sehr nah an der Fassade befinden, dass die Solarstrahlung auf sie reflektiert wird oder das Gebäude muss sehr hoch sein. Bei niedrigem Sonnenstand könnte die Sonnenstrahlung auch auf eine Person reflektiert werden, die sich in größerer Entfernung von der Fassade aufhält, allerdings ist dann die Wahrscheinlichkeit größer, dass die Fassade aufgrund von Umgebungsbebauung oder Bäumen in der Umgebung überhaupt nicht direkt besonnt wird.

Auf die Hagelwiderstandsfähigkeit von vorgehängten hinterlüfteten Fassaden (vgl. Kapitel 7.4.3) wird an dieser Stelle gesondert eingegangen. Wie bereits erwähnt, können als Bekleidungs-elemente unterschiedlichste Materialien verwendet werden, sodass eine große Bandbreite hinsichtlich der Gestaltung aber auch des Hagelwiderstands abgebildet wird. Für den Hagelwiderstand und die Recyclingfähigkeit ist die Wahl des Bekleidungs-materials entscheidend, da die dahinterliegenden Schichten der Hageleinwirkung vollständig entzogen sind.

Holzfasadenelemente sind nach Hagelregister für die Expositions-kategorie 1 geeignet, da hier nur Produkte registriert sind, die der Klasse HW 3 zugeordnet werden können. Faserzementplatten können hingegen einen Hagelwiderstand bis zu HW5 erreichen, wobei auch hier die meisten Produkte mit HW 3 klassifiziert werden. Eine hohe Resilienz gegenüber Hageleinwirkung weisen auch Kunststoffplatten auf, bei denen ein Großteil der klassifizierten Produkte HW 5 erreicht. Bei Dünnschichten für Fassaden ist in der Regel das optische Erscheinungsbild der kritische Faktor der Hagelwiderstandsfähigkeit. Durch die Hagelkörner können Dellen im Blech entstehen. Je nach Expositions-kategorie können also Fasadenelemente aus unterschiedlichen Materialien verwendet werden, sodass hier keine klare Empfehlung ausgesprochen werden kann. Über die VHF kann im Vergleich zum WDV-System ein weiteres Umweltpotential erschlossen werden. So ist ein sortenreiner Rückbau der Materialien aufgrund der Befestigung mit Verschraubungen sehr leicht möglich und die Komponenten können dem Stoffkreislauf rückgeführt werden. Anstatt einer VHF kann ebenso ein zweischaliges Mauerwerk eingesetzt werden. Zwischen der Dämmebene und der Blendebene befindet sich ein Luftspalt, der ähnlich wie bei der VHF die Funktion der Wasser- und Feuchteabführung erfüllt. Die Konstruktion kann als hagelsicher eingestuft werden, da Mauerwerk eine hohe Resilienz gegenüber Hagel aufweist. Das zweischalige Mauerwerk ist für alle Expositions-kategorien geeignet. Allerdings sind zweischalige Mauerwerkskonstruktionen im Hinblick auf die verbaute Graue Energie ungünstig.

#### 7.6.5. Photovoltaik und Solarthermie

Durch den VKF Beschluss Nr. B (VKF 2018b) werden nach IEC- und ISO-Normen geprüfte solare Elemente einer VKF Hagelwiderstandskategorie zugeordnet. Der Beschluss erging am 01.11.2016. Zu diesem Zeitpunkt waren für kristalline Silizium-Photovoltaik-Module noch die IEC 61215:2005 und für Dünnschicht-Photovoltaik-Module die IEC 61646:2008 gültig. Die darin beschriebenen Hagelprüfungen sind vom Ablauf und den Randbedingungen her identisch. Inzwischen wurde die Hagelprüfung für alle Photovoltaik-Module in der IEC 61215-2:2016 mit Korrektur 1 aus dem Jahr 2018 zusammengefasst. Dabei wurden am Ablauf und den Randbedingungen der Hagelprüfung jedoch keine wesentlichen Änderungen vorgenommen. Auch im vorliegenden Normentwurf E DIN EN IEC 61215-2:2019-06 bleibt die Hagelprüfung unverändert. Der Normdurchmesser der verwendeten Eiskugeln beträgt in allen Ausgaben 25 mm. Folglich ist davon auszugehen, dass VKF (2018) auch für die neuen Normausgaben seine Gültigkeit behält. Demnach werden PV-Module mit einer Abdeckung aus einem mindestens 3 mm dicken Einscheibensicherheitsglas und bestandener Hagelprüfung nach IEC der Hagelwiderstandskategorie HW 3 zugeordnet. Auch thermische Flachkollektoren mit einer Abdeckung aus einem mindestens 3 mm dicken Einscheibensicherheitsglas werden der Hagelwiderstandskategorie HW 3 zugeordnet. Auch die DIN EN ISO 9806:2018-04 für thermische Sonnenkollektoren wurde seit dem VKF Beschluss novelliert. Die darin definierte Schlagfestigkeitsprüfung mit Eiskugeln oder Stahlkugeln blieb ebenfalls im Wesentlichen unverändert.

Demnach sollten die darin getroffenen Zuordnungen Bestand haben. Nach DIN EN ISO 9806:2018-04 geprüfte thermische Röhrenkollektoren können ohne zusätzliche Hagelwiderstandsprüfung nach den Prüfbestimmungen der VKF maximal der Hagelwiderstandsklasse HW 3 zugeordnet werden. Das bedeutet auch ohne VKF Hagelwiderstandsprüfung kann bei Abdichtungsbahnen, Photovoltaikmodulen und thermischen Sonnenkollektoren von den europäischen bzw. internationalen Normprüfungen auf eine Hagelwiderstandsklasse – die mindestens eingehalten wird – geschlossen werden.

Durch die CE-Kennzeichnung von Photovoltaikmodulen bestätigt der Hersteller eines Photovoltaikmoduls, dass sein Produkt den geltenden Anforderungen genügt, die in den harmonisierten Rechtsvorschriften der Europäischen Gemeinschaft festgelegt sind. Bei der DIN EN IEC 61215-2:2019-06 handelt es sich um eine harmonisierte Norm, sodass jedes mit einem CE-Kennzeichen versehene Photovoltaikmodul den Aufprall eines Hagelkorns mit einem Durchmesser von mindestens 2,5 cm schadlos überstehen muss. Es ist zu empfehlen, die entsprechende Konformitätserklärung des Herstellers diesbezüglich zu prüfen. Eventuell liegen den Herstellern auch Prüfergebnisse für größere Hagelkorndurchmesser vor und es kann ein höherer Hagelwiderstand auf Nachfrage gewährleistet werden.

Werden an PV-Modulen technische Änderungen durchgeführt, verlieren die Ergebnisse der Hagelprüfung nach DIN EN IEC 61215-2:2019-06 unter Umständen ihre Gültigkeit. Welche Änderungen zulässig sind, damit der Hageltest seine Gültigkeit behält, regelt ICE/TS 62915:2018-05. Für Änderungen an thermischen Sonnenkollektoren und dadurch eventuell erforderliche Nachprüfungen gilt die Richtlinie der Europäischen Solar Keymark.

## 7.7. Sturm

Durch Sturm gefährdete Bauteile sind alle Bauteile, die direkten Kontakt mit der Außenumgebung haben. Dies sind insbesondere die Bauteilgruppen Dach und die Fassade. Aber auch kleinere Bauteile wie Raffstoren oder Dachaufbauten wie Photovoltaikanlagen sind der Gefährdung durch Sturm ausgesetzt. In ausführlichen Klimastudien mit detaillierten Klimamodellen, die z.B. vom Max-Planck-Institut für Meteorologie zusammen mit Deutschen Wetterdienst durchgeführt wurden, zeigten sich trotz Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Anteiles in der Atmosphäre keine klaren Tendenzen einer Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeiten. Wenn überhaupt, dann konnte eine Erhöhung um 0,20 m/s beobachtet werden, was weit unterhalb der natürlichen jährlichen Schwankung von ca. 5,0 m/s liegt (Plöger/Böttcher 2013). Auch die Zahl der Sturmereignisse hat sich in den Simulationsmodellen nicht signifikant geändert. Die zwar in den letzten 30 Jahren beobachtete Zahl der schweren Stürme über dem Nordatlantik (mit einem Luftdruck von unter 950 Hektopascal) hat sich zwar deutlich erhöht, gleichzeitig ist aber die mittlere Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht um ca. 5 % zurückgegangen. Auch über der Nordsee war in den letzten Jahrzehnten keine signifikante Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit zu beobachten. Da aber die mittlere Luftfeuchtigkeit in den letzten Jahrzehnten um deutlich über 1 % gestiegen ist, könnten die dann auftretenden Stürme zukünftig stärker sein, da Stürme bei höherer Luftfeuchte intensiver ausfallen (ebd.).

Die Zahl der Tornados in Deutschland ist derzeit mit ca. 100 bis 200 Ereignissen (inklusive kleineren Ereignissen) anzunehmen, eine eindeutige und klare Zunahme dieser Ereignisse zeichnet sich aber derzeit nicht ab. Die Wahrscheinlichkeit, dass gar ein Hurrikan über Mitteleuropa hinwegfegt, ist als äußerst gering einzustufen, da die geografische Verteilung der Wasser- und Landflächen in Europa eine Entstehung dieser Hurrikane nahezu ausschließt. Obwohl also keine klare Tendenz einer Erhöhung der mittleren Bemessungs-Windgeschwindigkeiten im mitteleuropäischen Raum infolge eines Klimawandels erkennbar ist (siehe auch Kapitel 5.5), ist doch mit verstärkten lokalen unweatherartigen Stürmen bzw. Gewitterstürmen vermehrt zu rechnen. Bei der Auslegung der Gebäudekomponenten im Dach- und Fassadenbereich sollten diese möglichen erhöhten Beanspruchungen beachtet werden. Dies gilt insbesondere für zusätzliche Bauelemente im Dach- oder Fassadenbereich wie zum Beispiel PV-Anlagen oder vorgehängte Fassaden.

Da die zukünftige Energieversorgung auch wesentlich auf einer dezentralen Energiebereitstellung z.B. durch PV-Anlagen beruht, ist es besonders wichtig, dass diese Anlagen auch nach ungewöhnlich heftigen lokalen Unwettereinwirkungen ihre volle Funktionstüchtigkeit erhalten. Eine zentrale großtechnische Energiequelle als Ausweichmöglichkeit wie beispielsweise Kohle steht zukünftig möglicherweise nicht mehr ausreichend zur Verfügung. Einen denkbaren Ausweg aus einer solch kritischen Situation bieten auch die zunehmend etablierten Energie-Communities, die über eine eigene Zusammenschaltung der jeweils beteiligten dezentralen Energiespeicher (z.B. Batterien) eine Notstromversorgung für lokale wettergeschädigte Regionen bereitstellen können. Die Einwirkung der Windlasten auf Gebäude und deren Bestandteile wird im europäischen Raum durch die DIN EN 1991-1-4:2010-12 mit der aktuellen Ausgabe vom Dezember 2010 geregelt. Die nationalen Anhänge zu dieser Norm enthalten zusätzliche länderspezifische Ergänzungen bzw. Sonderregelungen. In diesem nationalen Anhang werden z.B. die im deutschen Raum zu erwartenden Windgeschwindigkeiten aufgeführt, unterschieden nach den verschiedenen küstennahen oder binnenländischen Regionen. Zudem finden sich in der ebd. Angaben zu den Winddruckverteilungen entlang der Oberfläche von Bauwerken, wobei zwischen unterschiedlichen Bauformen wie rechteckige oder kreisrunde Baukörper unterschieden wird.

### 7.7.1. Dach

Insbesondere die Eck- und Randbereiche von Flachdächern sind einer sehr hohen Windsogbeanspruchung infolge von Windböen ausgesetzt. Für die statische Auslegung der Dachbeläge (z.B. Gehwegplatten oder Kiesschüttungen) oder PV-Anlagen sind diese Sogbeanspruchungen zu beachten. Dies ist oftmals mit großen zusätzlichen Massen z.B. für die Ballastierung von PV-Anlagen verbunden. Dabei bietet die Norm durchaus Möglichkeiten, durch eine Gestaltung der Dachbereiche die Soglasten z.B. bei Flachdächern nennenswert zu reduzieren.

In Abbildung 118 wird exemplarisch anhand der geometrischen Gestaltung der Attika im Dachrandbereich (Traufbereich) gezeigt, wie solche deutlichen Reduzierungen der Soglasten erreicht werden können. Dabei wird ein Gebäude mit quadratischem Grundriss der Abmessung 10 m x 10 m und einer Höhe von 6 m angesetzt. Die angenommene Böenwindgeschwindigkeit (als Mittelwert über 2 bis 3 Sekunden) von ca. 40 m/s (entspricht 144 km/h) richtet sich dabei nach der in Kapitel 6.5 definierten Expositionsklasse 3. Die Bezugsfläche für die Sogbeiwerte beträgt 3 m<sup>2</sup>. Bemerkenswert ist, dass z.B. eine gerundete Attika im Dachbereich hinter dem eigentlichen Randbereich (Breite hier ca. 1,0 m) zu einer mehr als 50 %-igen Reduzierung der Sogbeanspruchung führt. Dies ist auf die glattere, weniger verwirbelte Überströmung des Dachbereiches zurückzuführen.

In Abbildung 119 wird exemplarisch skizziert, wie eine solche gerundete Attika z.B. mit Hilfe eines im Rohbau verankerten Fertigteils ausgebildet werden kann. Dabei wird ein Gründach mit einer flachen, etwas nach innen versetzten Ost-West Aufständering einer PV-Anlage gezeigt. Der Hohlraum des Attika-Fertigteils kann zudem für die Führung von Kabeln oder Rohren verwendet werden. Die erforderlichen Führungen von Isolierungen und Dichtebenen richten sich dabei nach den genauen bauphysikalischen Randbedingungen.

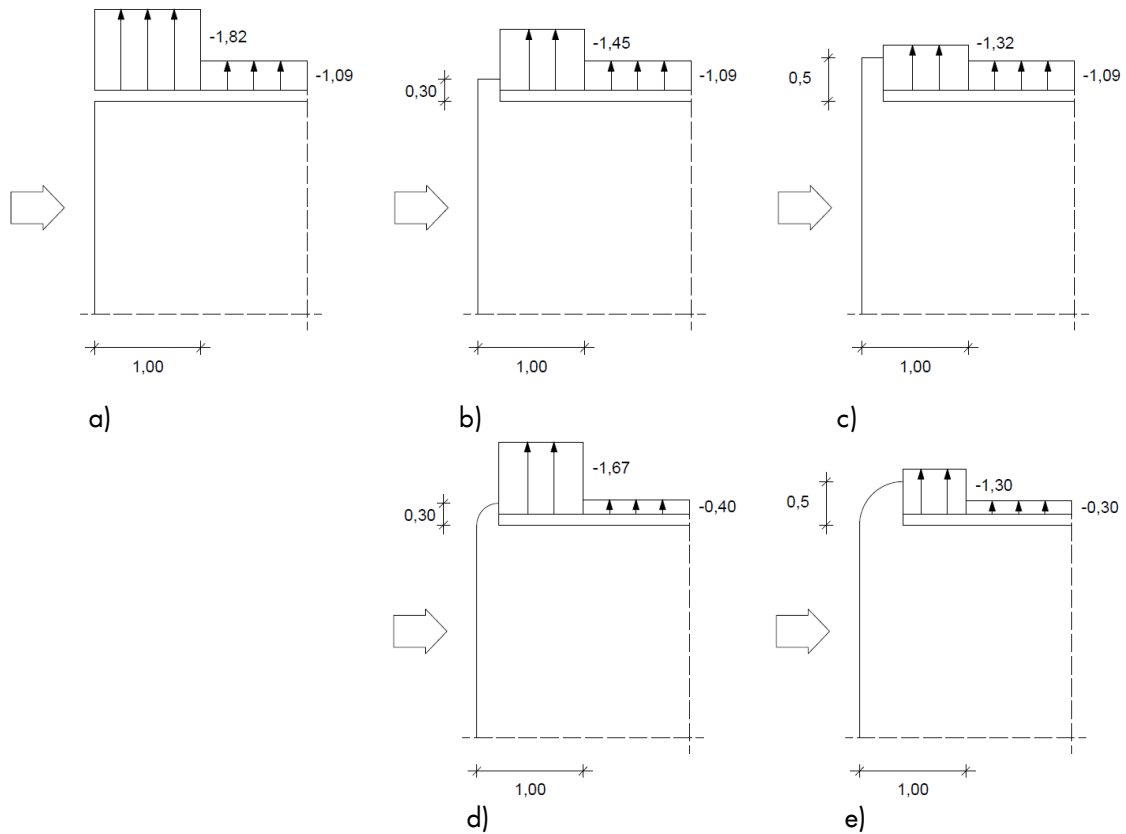


Abbildung 118: Einfluss der Gestaltung des Traufbereiches auf die Windsoglasten von Flachdächern (Sogbeiwerte gemäß DIN EN 1991-1-4:2010-12, Längenangaben in m)

- a) Scharfe Traufkante ohne Attika
- b), c) Traufkante mit niedriger bzw. hoher eckiger Attika
- d), e) Traufkante mit niedriger bzw. hoher runder Attika

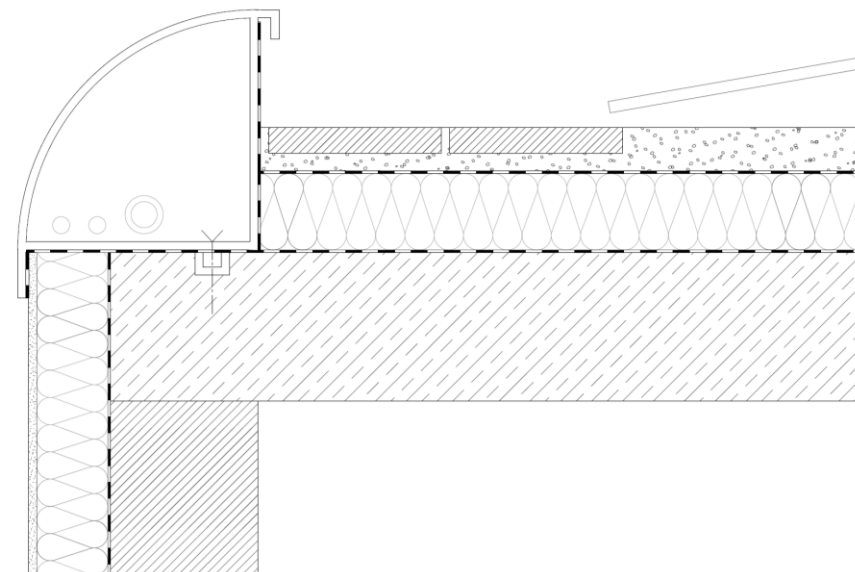


Abbildung 119: Mögliche Gestaltung eines abgerundeten Traufbereiches eines Gründaches mit Hilfe eines in der Tragstruktur verankerten Attika-Fertigteiles (schematisch)

Neben der konstruktiven Gestaltung der Attikabereiche eines Flachdaches gibt es noch weitere Möglichkeiten, die Windsogbeanspruchungen von Dachaufbauten auf einem Flachdach zu reduzieren. In Abbildung 120 wird am Beispiel von aufgeständerten PV-Anlagen gezeigt, wie die Gestaltung der Aufständering Einfluss auf die Windsogkräfte hat. Besonders kritisch sind Anordnungen von thermischen Solarmodulen zu sehen, die meist einen relativ steilen Aufstellwinkel besitzen, um eine bessere Warmwassererzeugung in Winterzeiten zu erreichen. Hierfür sind dann hohe Ballastierungen oder andere Befestigungsmöglichkeiten vorzusehen.

Eine deutliche Verbesserung lässt sich mit an die Traggestelle der PV-Module angeschlossenen Rücken- und Seitenschilden erreichen. Damit wird der Aufbau einer Winddruckbeanspruchung unterhalb der PV-Module vermieden, zudem kann durch einen Wind-Düseneffekt ein leichter stabilisierender Unterdruck unterhalb der Module erzeugt werden. Die geringsten Sogbeanspruchungen ergeben sich für die flachen, meist mit ca. 10 ° geneigten PV-Module in einer Ost-West-Aufständering. Zwar ist der Gesamtertrag pro Modul bei dieser Aufständering geringer als bei einer Südaufständering, dafür ist die Ausnutzung der Dachfläche besser.

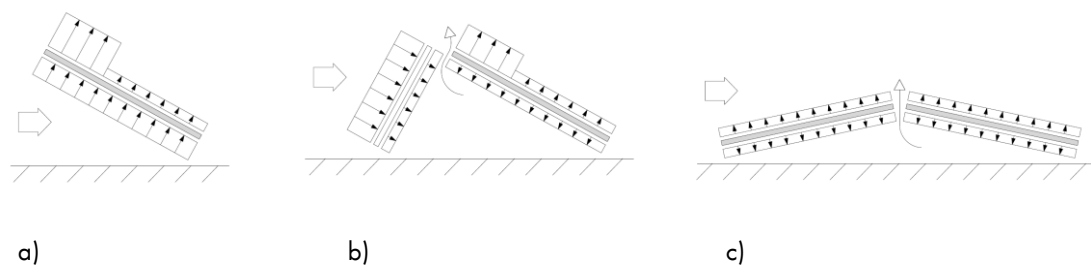


Abbildung 120: Einwirkung von Windkräften auf PV-Module, die auf einem Flachdach aufgeständert sind (schematisch)

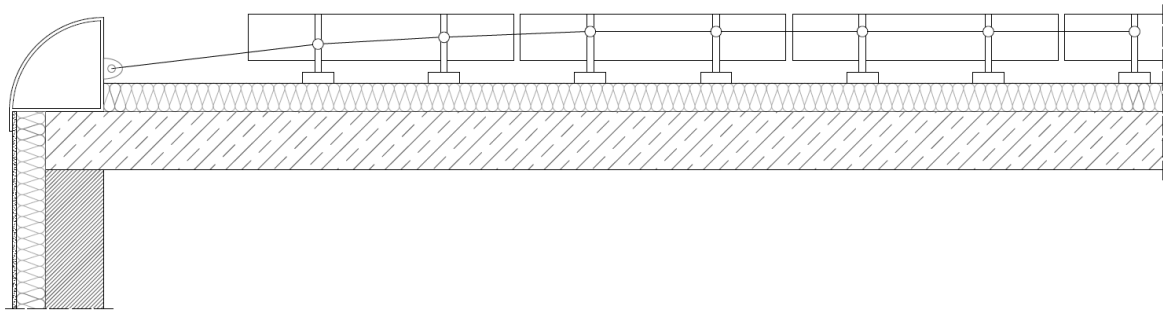
- a) Hinten offenes PV-Modul mit abhebenden Sog- und Druckkräften
- b) PV-Modul mit Rückenschild mit deutlich geringeren abhebenden Sogkräften
- c) PV-Modul bei einer flachen Ost-West Aufständering

Weitergehende Informationen mit z.B. Berichten über Ergebnisse von Windkanalstudien finden sich u.a. in Ruscheweyh et al.; Ruscheweyh/Polyzoides; Ruscheweyh; Ruscheweyh/Windhövel (2011; 2013; 2009; 2013) sowie Kray/Hunke (2011). Um eine konstruktive Durchdringung der Dachhaut zu vermeiden, werden die PV-Module auf Flachdächern meist durch eine Ballastierung gegen die Windsoglasten gesichert. Von Nachteil bei dieser Sicherung ist die zusätzlich statisch zu berücksichtigende Last sowohl für das Dachtragwerk als auch für die Stützen, Wände und Fundamente.

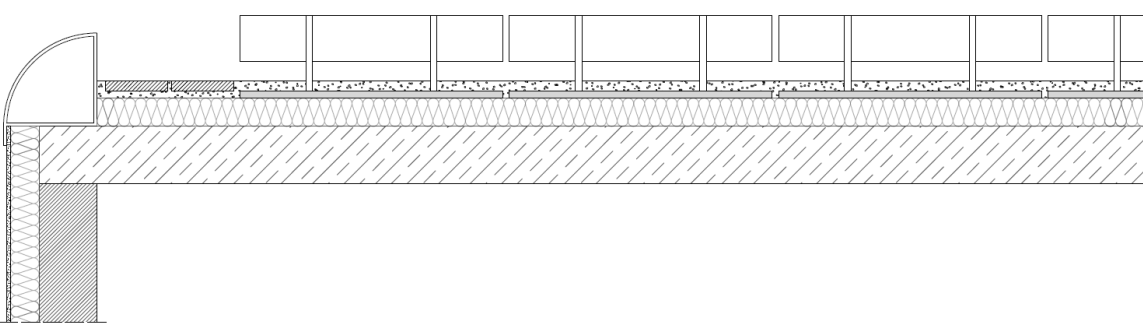
Als Unterstützung oder Alternative für diese Ballastierung kann z.B. ein Seilnetz dienen, das zwischen den Attikas oberhalb der Dichtebene verspannt wird und an das alle PV-Elemente angeschlossen werden (Abbildung 121a). Zu Reduzierung der statischen Belastung des Tragwerks kann z.B. bei einem Gründach das Gewicht des ohnehin vorhandenen Granulats als Ballastierung verwendet werden. Dies ist möglich durch statisch tragende, unterhalb des Granulats angeordnete Plattenelemente, an die die PV-Module statisch angeschlossen werden (Abbildung 121b).

In Abbildung 122 ist beispielhaft der Grundriss einer PV-Anlage gezeigt, die mit Hilfe eines Seilnetzes zusätzlich gesichert wird. Die steiler aufgerichteten thermischen Solarmodule sowie weitere aufragenden Dachelemente wie z.B. Schornsteine oder Lüftungsanlagen sollten dabei nach Möglichkeit immer im nördlichen Bereich eines Flachdaches aufgestellt werden, um Verschattungen der PV-Module zu vermeiden.





a)

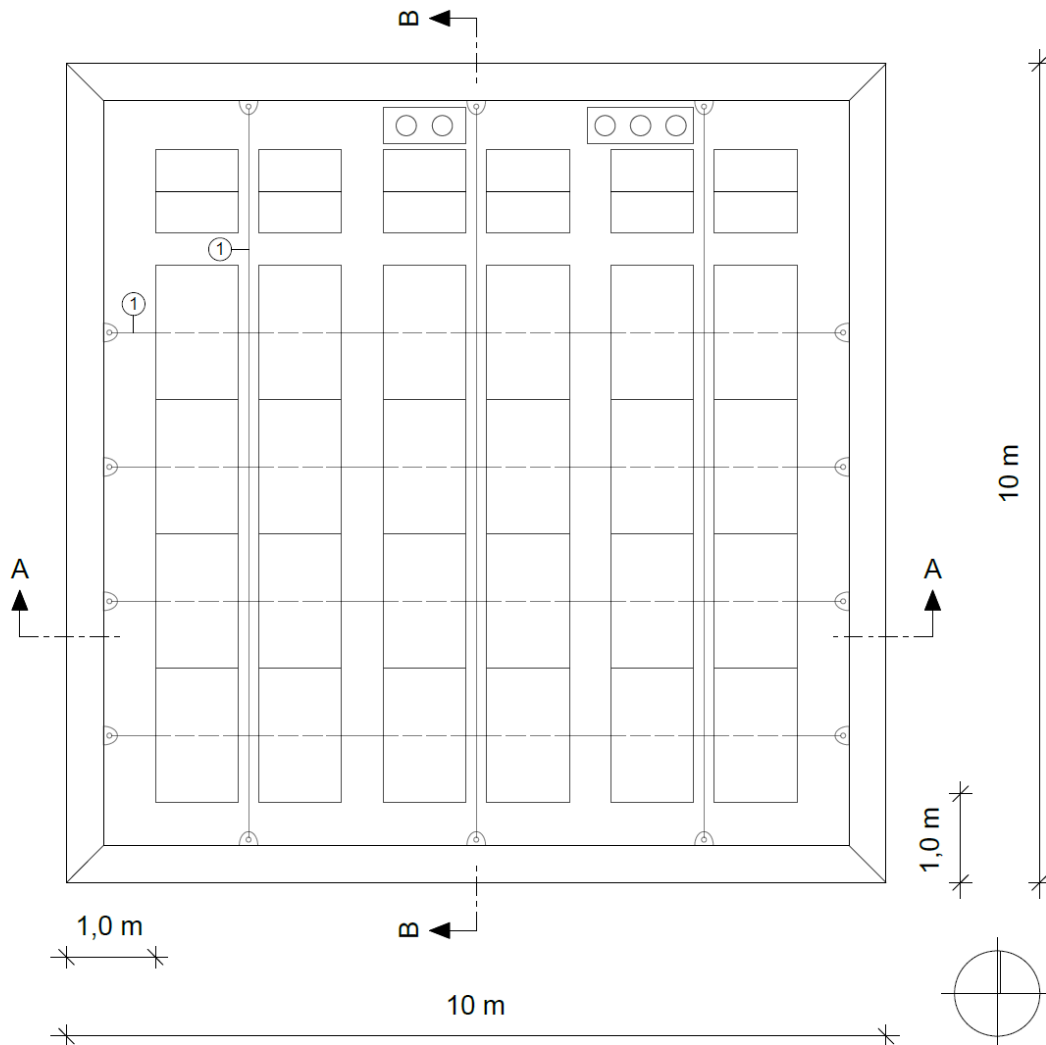


b)

Abbildung 121: Mögliche zusätzliche Sog- und Verschiebesicherung einer aufgeständerten PV-Anlage (z.B. Ost-West-Aufständigung) durch

- a) ein zwischen den Attiken verspanntes Seilnetz
- b) Nutzung des Eigengewichts eines Gründach-Granulats

Die in unseren Breitengraden übliche Dacheindeckung bei Satteldächern erfolgt durch Dachziegel, die überlappend auf Dachlatten aufgelegt werden und durch ihr Eigengewicht die lokalen Windsogkräfte aufheben können. Zunehmend werden nun auch Solar-Dachziegel angeboten, die eine ähnliche Optik zu Dachziegeln haben und in einer ähnlichen Weise verlegt werden. Aufgrund vermehrter Schäden durch im Sturm gelöster Dachziegel ist seit 2011 für Neubauten eine zusätzliche Sicherung der Dachziegel durch sogenannte Sturmhaken erforderlich, alte Dächer genießen Bestandsschutz. Die Sturmhaken greifen dabei jeweils in die Falze der Dachziegel ein und werden entweder unter die Dachlatten geklemmt oder in diese eingeschlagen. Die genaue Anzahl der Sturmhaken richtet sich nach den Sogbeanspruchungen in den einzelnen Dachbereichen, im Mittel sind 3 bis 4 Sturmhaken pro m<sup>2</sup> erforderlich. Form und Anbringung der Sturmhaken sind dabei in DIN EN 14437:2005-02 geregelt. Wichtig ist, dass die Dachlatten, die durch die Sturmhaken nun zusätzlich auf Windsog beansprucht werden, auch mit entsprechender Sorgfalt, z.B. durch Verwendung geeigneter Schrauben oder Sondernägeln, an den Dachsparren befestigt werden.

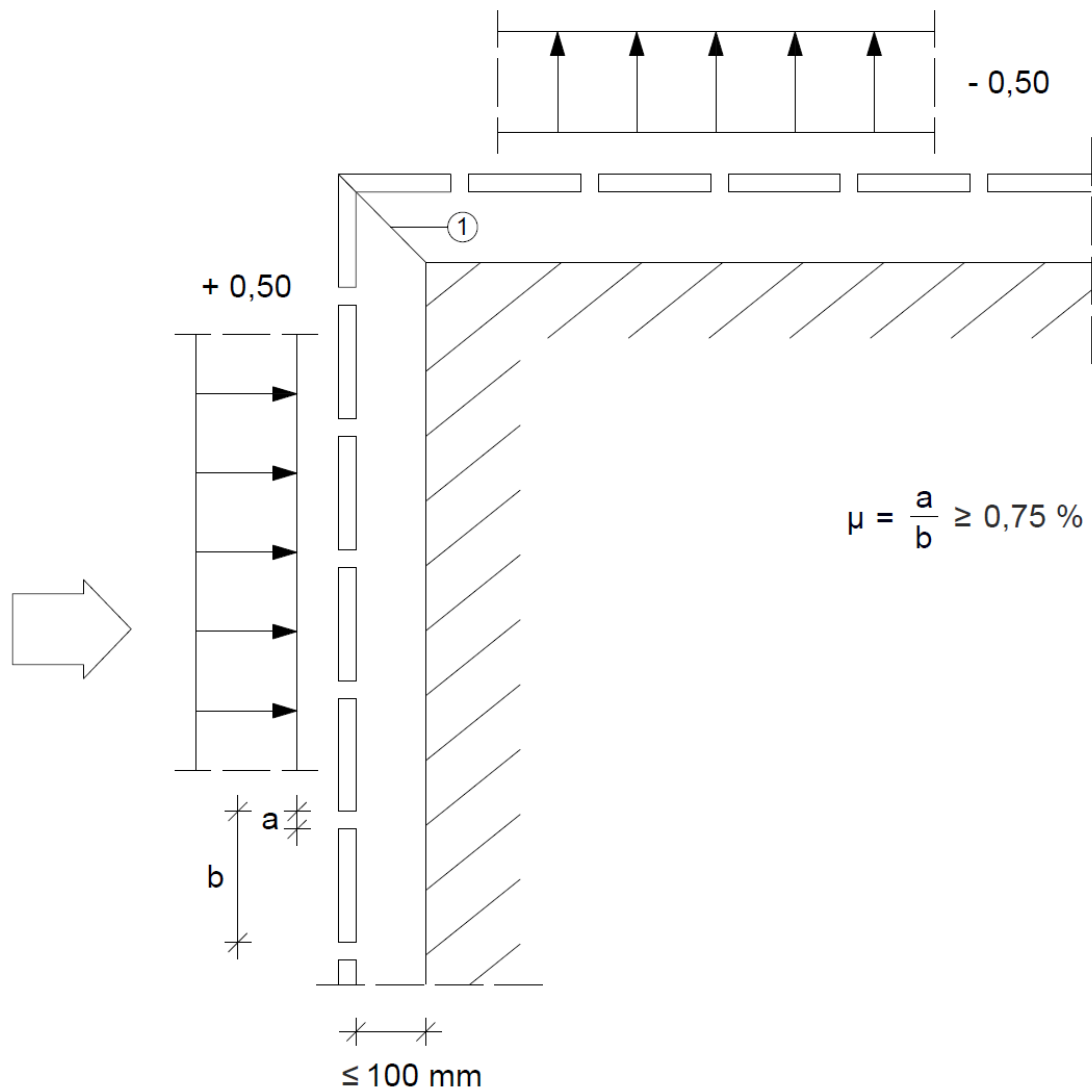


① Seilverspannung als zusätzliche Verschiebe- und Sogsicherung

Abbildung 122: Beispiel für die Ost-West-Aufständigung einer PV-Anlage auf einem Flachdach, bei dem eine zusätzliche Sicherung durch ein an die umlaufende Attika befestigtes Seilnetz erfolgt

### 7.7.2. Fassade

Generell kann eine PV-Anlage auch in den Wandbereichen eines Gebäudes angeordnet werden, was fassadentechnisch einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassade entspricht. Sind dabei die Hinterlüftungsspalte bei einer Gebäudeecke aerodynamisch verbunden, entstehen durch Ausgleichsströmungen innerhalb der Hinterlüftungsspalte vom luvseitigen, winddruckbeanspruchten Wandbereich zum windparallelen, windsogbeanspruchten Wandbereich große Sogbeanspruchungen für die Fassadenelemente in den Eckbereichen (Gerhardt/Janser/Kramer 1995). Daher sollte auf eine luftdichte, lotrecht durchlaufende Abschottung der einzelnen Wandbereiche geachtet werden, um die Sogbeanspruchungen auf die vorgehängten Fassadenelemente deutlich zu verringern. Die Permeabilität (das Verhältnis der offenen Fläche zur Gesamfläche) sollte generell bei hinterlüfteten Fassaden gemäß DIN EN 1991-1-4:2010-12 0,75 % nicht unterschreiten, die Spaltbreite maximal 10 cm betragen, siehe Abbildung 123.



① Winddichte Trennung der Hinterlüftungsspalten

Abbildung 123: Reduzierte Sogbeiwerte für die Fassadenelemente einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade durch eine winddichte Trennung der zur Windrichtung senkrechten und parallelen Wandbereiche (Sogbeiwerte gemäß DIN EN 1991-1-4:2010-12)

## 8. Handlungsempfehlungen für die Gebäudebegrünung und Außenanlagengestaltung

### 8.1. Glossar

**Ökosystemdienstleistungen:** (auch: Ökosystemleistung oder ökosystemare Dienstleistung) sind die "Vorteile" bzw. "Nutzenstiftungen" (engl. benefits), die Menschen von ökologischen Systemen beziehen. Diese beinhalten laut gängiger Definition aus dem Methodenband Millenium Ecosystem Assessment (Alcamo 2003)

- Bereitstellende Dienstleistungen,
  - Bereitstellung von Nahrung, Wasser, Baumaterial (Holz), Fasern, Rohstoffen für Arzneimittel
- Regulierende Dienstleistungen,
  - Regulierung von Klima, Überflutungen, Krankheiten, Wasserqualität, Abfallbeseitigung, Bestäubung
- Unterstützende Dienstleistungen und
  - Bildung von Boden, Erhalt des Nährstoffkreislaufes
- Kulturelle Dienstleistungen.
  - Erholungsraum, spirituelle Erfüllung

**Gebietsfremd:** Für Begrünungen eingesetztes Saatgut und Pflanzenmaterial das oft aus anderen, weit entfernten Gebieten stammt. Durch eine Ausbreitung des gebietsfremden Pflanzenmaterials kann die vorhandene regionalspezifische genetische Vielfalt beeinträchtigt werden – beispielsweise durch Hybridisierung. Deshalb ist es sinnvoll, im naturnahen Umfeld, aber auch an geeigneten Stellen im Stadtgebiet, gebietseigenes Saatgut und Pflanzenmaterial zu verwenden, das auch an die regionalen Bedingungen angepasst ist.

**Neophyten** (Adventivpflanzen): Pflanzen, die als „Neueinwanderer“ nach dem Jahr 1492 in ein Gebiet gelangt und dort Bestandteil der Flora geworden sind. Einige invasive Neophyten haben sich zu großen Beständen ausgeweitet und verdrängen die ursprüngliche Flora.

### 8.2. Motivation

Ziel des Projektes ist es, durch eine gewählte Konstruktion nicht nur die Widerstandsfähigkeit des Gebäudes zu erhöhen, sondern in Kombination mit einer Einbindung biologischer Prozesse einen Mehrwert für das Gebäude und die Umgebung (Umwelt) zu bewirken. Der Mehrwert besteht in ausgearbeiteten Synergien biologischer Konzepte, die sich positiv auf Klimaeinwirkungen (z.B. Stadtklima und Regenwasserretention) und Umwelteinwirkungen (Biodiversität und Feinstaubverminderung) auswirken. Die adressierten Bereiche sind die Gestaltung – insbesondere die Pflanzenverwendung - von (Flach-)Dach, Fassade und Außenanlagen, die mit technischen und biologischen Systemen eine erhöhte Resilienz und verminderte Vulnerabilität für prognostizierte Klimaänderungen hervorbringen. Als Teilgebiet wird im Folgenden der Fokus auf die Einbindung biologischer Prozesse z.B. durch Dach- und Fassadenbegrünung sowie Gestaltung der Außenanlagen gelegt, um deren Mehrwert für Regenwasserretention, Stadtklima, Feinstaubreduktion und Biodiversität zu erfassen. Dabei wurde der Stand der Forschung interdisziplinär recherchiert, katalogisiert und beurteilt sowie dringender und notwendiger Forschungsbedarf adressiert. Die vier Themenbereiche der Klima- und Umweltpotentiale müssen jeweils bezüglich der Gebäudebereiche Dach, Fassade, Außenanlagen getrennt betrachtet werden, da entsprechende sinnvolle Optimierungsszenarien völlig unterschiedlich ausgestaltet werden müssen.

Mögliche Synergien zur Resilienz der Klimateinwirkungen Hitze, Hochwasser, Starkregen, Hagel, Sturm sowie Wechselwirkungen zur Reduktion der Feinstaubbelastung, Biodiversität, Regenwasserretention und des Stadtklimas werden dabei ebenfalls berücksichtigt. Damit baut dieses Kapitel u.a. auf den Leitfaden Nachhaltiges Bauen und dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen des Bundesbauministeriums (Dorn-Pfahler/Stritter 2017) sowie verschiedenen Normen, Richtlinien und Empfehlungen, wie bspw. der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau (FLL), der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), des Arbeitskreises „Stadt bäume“ der Deutschen Gartenamtsleiterkonferenz (GALK) oder der Verbände (z.B. BdB – Bund deutscher Baumschulen), die den Stand der Technik repräsentieren und weiterentwickeln, auf. Bezüglich grundsätzlicher Fragestellungen zur Dach- und Fassadenbegrünung wird auf die aktuellen Veröffentlichungen des Bundesamt für Naturschutz (BfN)(Kabisch et al. 2017; Schmauck 2019) und den Richtlinien der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL 2018a, 2018b) sowie bzgl. der Grünentwicklung auf das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR 2019a, 2019b) verwiesen. Bezüglich grundsätzlicher Fragestellungen zu Außenanlagen wird auf Informationen des Bundesbauministeriums wie zum Beispiel das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Außenanlagen von Bundesliegenschaften (BNB\_AA Version 2016) oder der BBSR-Broschüre zum nachhaltigen Planen von Außenanlagen (Richter et al. 2019) verwiesen.

### 8.3. Potentiale der Pflanzenauswahl – Invasive Konkurrenz

Städte- und Landschaftsplaner befinden sich an der Schnittstelle zwischen Praxis und Theorie und müssen zunehmend der steigenden Nachfrage nach unterschiedlichen Funktionalitäten von Begrünungen gerecht werden. So steigt auch die Komplexität von Begrünungen und die Eigenschaften von Pflanzengemeinschaften, die besondere funktionelle Ökosystemdienstleistungen erbringen sollen, nehmen zu. Dies gilt insbesondere für Dach- und Fassadenbegrünungen sowie Außenanlagen, da die Ökosystemdienstleistungen dieser künstlichen Pflanzengemeinschaften sich häufig auf menschliche Bedürfnisse beziehen. Diese gehen teilweise über den einfachen ästhetischen Reiz hinaus wie z.B. Regulierung der Lufttemperatur, Luftverschmutzung, Starkregenereignisse; Verbesserung der Wärmedämmung des Gebäudes und Bereitstellung von Lebensraum.

Ein aktuelles und viel diskutiertes Beispiel ist der Einsatz von Sukkulenten in der extensiven Dachbegrünung. Insbesondere die Gattung "*Sedum*", auch als Mauerpfeffer oder Fetthenne bezeichnet, hat sich über Jahre in der kommerziellen Praxis bewährt, wird aber inzwischen von vielen Experten auch kritisch als "Sedum-Wüste" betrachtet. Einerseits haben Dachbegrünungsunternehmen positive Erfahrungen in Bezug auf die Vermehrung, das Ausbringen und Anwachsen und den geringen Pflegeaufwand dieser robusten und Trockenstress überstehenden Pflanzen gesammelt. Andererseits werden inzwischen Vegetationsmatten verschiedener Hersteller angeboten, die nur aus *Sedum*-Arten bestehen und damit die Pflanzen-Vielfalt bei der Begrünung enorm reduzieren (Hofstetter Mühle GmbH 22. 10. 2019; Knauf Insulation 22. 10. 2019). Diese Sedumteppiche bestehen aus bis zu zwölf unterschiedlichen Sedumarten, was zumindest eine gewisse Vielfalt widerspiegelt. Das eigentliche Problem mit den *Sedum*-Arten ist, dass die meisten nicht aus der näheren Region stammen (z.B. Spanien: *S. hispanicum*, Mongolei: *S. hybridum*, Himalaja: *S. ewersii*), nur wenige tatsächlich einheimisch in Deutschland sind und verschiedene verwendete Arten unter dem Verdacht stehen, invasive Neophyten darzustellen. So werden zum Beispiel die zwei Arten *Sedum spurium* (Kaukasus-Fettkraut; aktuell *Phedimus spurium*) und *Sedum stoloniferum* (Ausläuferbildendes Fettkraut) bereits in der Schweizer Watchliste aufgeführt (Infoflora 2014; Wittenberg et al. 2006). Diese offizielle Liste beinhaltet die invasiven Neophyten, bei denen ausgehend vom jeweiligen Kenntnisstand ein mittleres bis hohes Ausbreitungspotential in der Schweiz gegeben oder zu erwarten ist.

Es ist davon auszugehen, dass die gebietsfremden Arten in der Schweiz zukünftig durch Einwanderung, Verschleppung oder kommerzielle Ansiedlung auch eine Bedrohung für die biologische Vielfalt und die Wirtschaft in Deutschland darstellen können. Tatsächlich wird inzwischen *S. spurium* seit 2013 in Deutschland als invasive Art geführt (Nehring 2013). Das Ausbringen dieser gebietsfremden Arten bedeutet, dass die kommerzielle Dachbegrünung mit dieser Form von Vegetationsmatten aktiv und direkt dazu beiträgt, invasive bzw. potentiell invasive Arten in Deutschland zu verbreiten.

Ein weiterer negativer Aspekt der Verbreitung von Neophyten ist der Effekt auf die heimische Tierwelt. Grundsätzlich vermehren sich viele Sedum-Arten vegetativ und die Bestäubung durch Insekten ist nicht essentiell für die Reproduktion. Dementsprechend weisen sie zwar zahlreiche Blüten pro Pflanze auf, besitzen jedoch nur eine sehr kurze Blühperiode als Nahrungsangebot für Insekten (Snodgrass/Snodgrass 2006; Bosch/Retana/Cerdá 1997). Des Weiteren konnte in einer Studie von Dachbegrünungen in Toronto festgestellt werden, dass gebietsfremde Sedum-Arten hauptsächlich von gebietsfremden Wildbienen bestäubt werden, während heimische Arten die exotischen Sedum-Arten weniger häufig anfliegen und dafür lieber gebietsheimische Sedum- und andere Pflanzenarten bestäuben (Maclvor/Ruttan/Salehi 2015). Neophyten unterstützen somit Neozoen und treten ökologisch in Konkurrenz zu gebietsheimischen Tier- und Pflanzenarten. Teilweise führt auch die Kombination aus Neophyt und entsprechend bestäubenden Neozoen zu invasiver Ausbreitung. Einige Arten sind durch das Fehlen geeigneter Bestäuber eingeschränkt, aber die Einführung exotischer Bestäuber kann eine schnelle Verbreitung erleichtern (Stout/Kells/Goulson 2002) – so z.B. die Einführung der Honigbiene in Tasmanien und damit verbundene invasive Ausbreitung der Busch lupine (*Lupinus arboreus*), die von heimischen Insekten kaum besucht wird. Von anderen invasiven Pflanzenarten ist bekannt, dass sie den Insektenbesuch heimischer Pflanzen durch volatile Substanzen reduzieren (z.B. Gibson/Pauw/Richardson 2013). Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass sich bis zu 90% aller Insekten-Pflanzenfresser (Herbivoren) nur auf Pflanzen erfolgreich vermehren können, mit denen sie eine Evolutionsgeschichte geteilt haben (Bernays/Graham 1988).

Zahlreiche Publikationen warnen daher aus wissenschaftlichen Gründen vor der Verwendung nicht-heimischer Pflanzen (Übersichtsartikel: Butler/Butler/Orians 2012). Die Invasion durch exotische Pflanzen bedroht somit weltweit ökologische Gemeinschaften. Bei der Auswahl der Pflanzenarten sollte daher auf Zuchtarten, gebietsfremde, potentiell invasive und invasive Arten sowie Neophyten verzichtet werden (Nehring/Skowronek 2017; Wittenberg et al. 2006). Heimische Pflanzen weisen diesen Arten gegenüber zahlreiche zusätzliche Ökosystemdienstleistungen auf, die sie im Laufe der Evolution zusammen mit anderen heimischen Organismen zu komplexen Nahrungsnetzen entwickelt haben.

Diese Leistungen eröffnen regionale gebietsheimische – sogenannte autochthone - Wildarten (erhältlich z.B. nach RegioZert zertifiziertes Saatgut oder VWW-Regiosaat (Verband deutscher Wildsamens- und Wildpflanzenproduzenten e.V. (VWW)), die unterteilt werden in 22 Herkunftsregionen (Prasse/Kunzmann/Schröder 2010). Ebenso berücksichtigen sie das sogenannte Regiosaatgut- und Regiopflanzgut-Konzept sowie naturraumgetreues oder lokales Pflanzenmaterial. Bei der Umsetzung des Regiosaatgut- und Regiopflanzgut-Konzeptes kann die Online-Plattform "Artenfilter Regiosaatgutarten" zur Hilfe genommen werden (DBU 2009). Des Weiteren müssen bei der Pflanzenauswahl standortbedingt ökologische Faktoren berücksichtigt werden, wie beispielsweise die Standortgerechtigkeit (winterfest, wärmetolerant, schadstofftolerant,...), der Blühzeitraum (um ein kontinuierliches attraktives Blütenangebot über die gesamte Vegetationsperiode zu gewährleisten), die Blütenfarbe, die Wuchshöhe, die Bestäubungsökologie (Wind-, Insekten-, Selbstbestäubung), aber auch zukünftige Klimafaktoren wie bspw. zunehmender Hitze- und Trockenstress. Die Verwendung regionaler gebietsheimischer autochthoner Wildarten wird beispielsweise bereits in der Schweizer Norm für Dachbegrünungen empfohlen (SN 564312, SIA 312: 2013). Für die Bundesrepublik gilt nach dem Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) (BRD 2009: § 40) ab dem 1. März 2020 verbindlich, dass nur noch autochthone Arten in der freien Natur (gilt auch für entsprechenden Begrünungs- und Bepflanzungsmaßnahmen an Verkehrswegen) ohne Genehmigungspflicht ausgebracht werden dürfen.

#### 8.4. Größere Umweltpotentiale und Nachhaltigkeit durch regionale Arten

Grünanlagen, Grünstreifen, Außenanlagen, Dachbegrünungen und Fassadenbegrünungen im urbanen Raum haben einen enormen Einfluss auf Naturschutz, Stadtklima, Artenschutz, klimaangepasstes Bauen und klimaangepasste Stadtplanung. Klimaauswirkungen wie Hitze, Starkregen, Hagel, Schnee, Sturm, sowie Umweltbelastungen wie Feinstaub und das Artensterben können durch ein intelligentes Management im Bereich der Biologisierung der Stadt weitreichende ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Vorteile beinhalten. Für alle Bereiche müssen unbedingt Kriterien eingehalten werden, die z.B. die Nachhaltigkeitszertifikate DGNB, BNB, BREEAM, LEED als Mindeststandard berücksichtigen. Bezüglich Biodiversität wären das u.a. BREEAM Land Use and Ecology LE 05: Long term impact on biodiversity sowie das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Außenanlagen, Kriterium BNB\_AA 1.1.4 Biodiversität.

In mitteleuropäischen Städten wird ein durchschnittlicher Anteil von ungefähr 40 % an nicht-einheimischen Arten am Gesamtartenbestand der höheren Pflanzen angegeben (Pysek 1998), wenn Archäophyten und Neophyten zusammen gezählt werden (Werner/Zahner 2009). Für nordamerikanische Städte liegt der Wert bei ca. 35 % (Clemants/Moore 2003). Nicht nur daher hat der Einsatz einheimischer Pflanzen zur Begrünung in den letzten Jahren große Aufmerksamkeit auf sich gezogen (Butler/Butler/Orians 2012; Kowarik/Bartz/Cloos 2012). Zum einen liegt dies an der Gefahr der Einwanderung und Verdrängung gebietsheimischer autochthoner Wildarten (z.B. Kinlock/Schindler/Gurevitch 2016) und zum anderen aufgrund der Erkenntnisse, dass einheimische Pflanzen besser physiologisch und morphologisch an regionale Klimata angepasst sind. Auch der regional unterschiedliche Genpool führt zu einer genetisch stabileren Gemeinschaft z.B. gegenüber Schädlingen. Mit den Fachvertretern der zuständigen Behörden der Bundesländer und der Saatgutproduzenten des VWW wurde in diesem Kontext eine Gliederung Deutschlands in 22 Herkunftsregionen abgestimmt (Abbildung 124), die in 8 Produktionsräume zusammengefasst werden (Abbildung 125). Die 16 Übergangsherkünfte in den Herkunftsregionen werden durch gleiche Farbe gekennzeichnet und gelten von 2009 - 2019 als Mindeststandard (Prasse/Kunzmann/Schröder 2010). Die Unterschiedlichkeit der Genetischen Pools wurden auch molekularbiologisch mittels genetischen Fingerprints (AFLP) bestätigt (Durka et al. 2017).

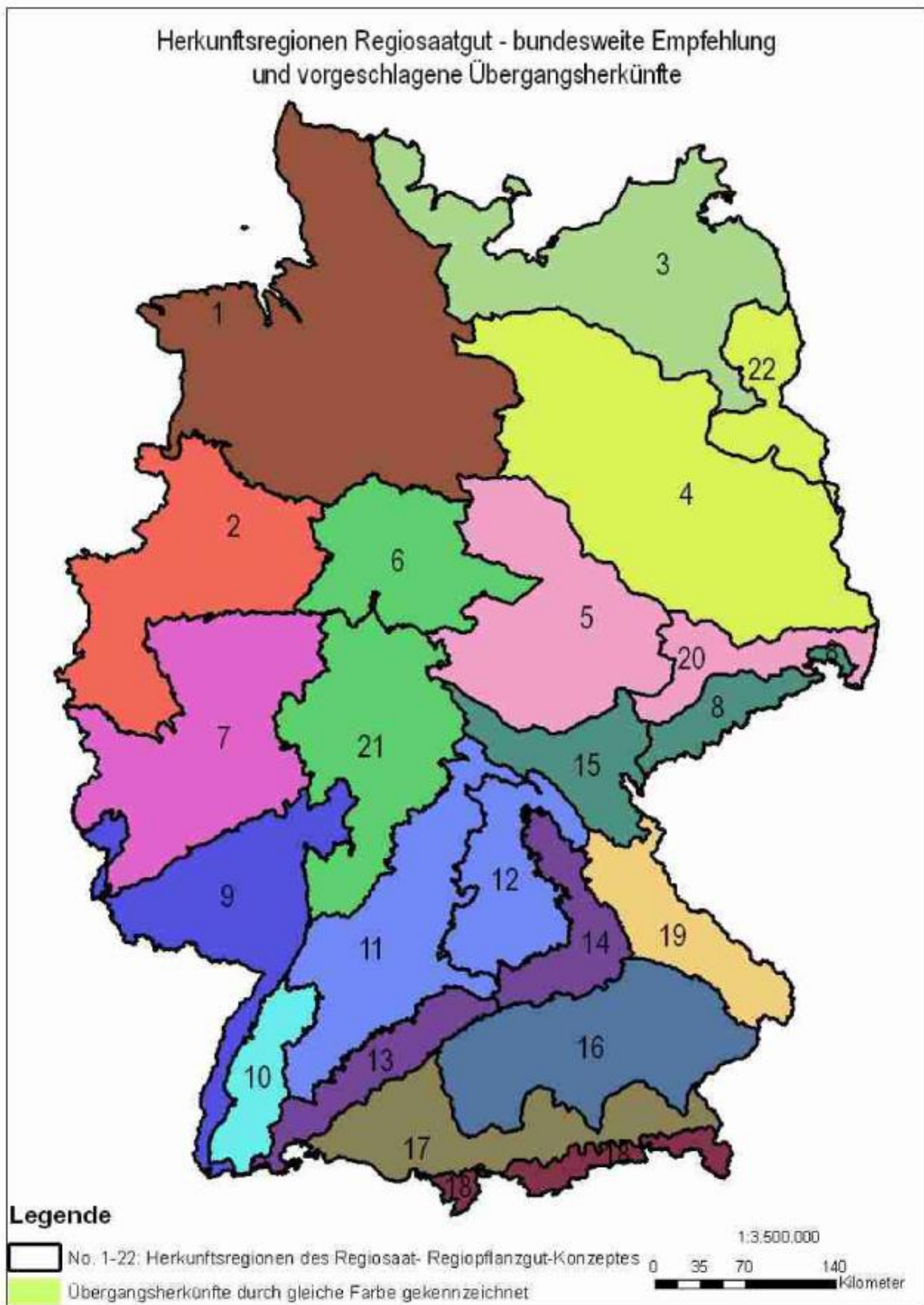


Abbildung 124: Herkunftsregionen und Produktionsräume für Regiosaatgut, Gliederung Deutschlands in 22 Herkunftsregionen (die 16 Übergangsherkünfte, durch gleiche Farbe gekennzeichnet, gelten von 2009 - 2019 als Mindeststandard)



# Regionen im VWW

22 Herkunftsregionen  
8 Produktionsräume



[www.natur-im-vww.de](http://www.natur-im-vww.de)

Abbildung 125: Herkunftsregionen und Produktionsräume für Regiosaatgut, Zusammenfassung der Herkunftsregionen in 8 Produktionsräume (Prasse/Kunzmann/Schröder 2010)

Nach dem Landesnaturschutzgesetz von Baden-Württemberg (BW 2015) ist für Baden-Württemberg bereits bei Saaten in der freien Landschaft nur noch Saatgut zu verwenden, das von Mutterpflanzen aus dem gleichen regionalen Herkunftsgebiet stammt. Wie bereits erwähnt gilt nach dem BNatSchG verbindlich ab dem 1. März 2020 dass nur noch autochthone Arten in der freien Natur ohne Genehmigungspflicht für die gesamte Bundesrepublik eingesetzt werden dürfen (BRD 2009: § 40). Diese Regelung wurde nicht für den besiedelten Bereich formuliert, obwohl sich sowohl die wissenschaftlichen Erkenntnisse als auch die gesellschaftliche Wahrnehmung im Kontext des dokumentierten dramatischen Artensterbens (Seibold et al. 2019; Hallmann et al. 2017) für eine Regelung autochthoner Arten in der Stadt aussprechen. Somit unterliegt das Ausbringen von gebietsfremden Arten im innerstädtischen und innerörtlichen Bereich sowie in Splittersiedlungen, Gebäuden zugeordneten Gärten und Wochenendhausgebieten im Außenbereich sowie Sportanlagen nicht der Genehmigungspflicht. Das heißt aber nicht, dass gebietsfremde Arten in Letzteren gepflanzt werden müssen. So ist die Verpflichtung, gebietseigene Pflanzen im besiedelten Bereich zu verwenden, auch schon zu großen Teilen in der "Berliner Strategie zur Biologischen Vielfalt" verwirklicht (Kowarik/Bartz/Cloos 2012). Zum Thema gebietseigene Pflanzen ist dort im formulierten Ziel 16 angestrebt, auch innerhalb des bebauten Gebietes verstärkt zertifiziertes gebietseigenes Pflanzen- und Saatgut zu verwenden (ebd.). Des Weiteren ist es heute schon fast Standard, in Ausschreibungen „Wildblumensaatgut aus gebietseigener Herkunft“ zu verlangen. Auch die Schweizer Norm für Dachbegrünungen (SN 564312, SIA 312: 2013) sowie das BfN (Schmauck 2019) empfehlen die Verwendung regionaler gebietsheimischer autochthoner Wildarten.

Eine detaillierte klimaangepasste Pflanzenliste seitens des BBSR zu empfehlen, ist auf Basis der momentanen Datengrundlage schwierig, da dann für jede der acht Regionen nicht nur eine eigene Liste produziert werden müsste, sondern diese Auflistung auch funktionelle Kombinationen und entsprechende gesicherte Umwelt- und Klimapotentiale der Pflanzenarten aufführen sollte. Des Weiteren müssen, wie oben erwähnt, standortbedingt ökologische Faktoren berücksichtigt werden (z.B. Standortgerechtigkeit, Blühzeitraum, Klimaaspekte, die eine Zunahme der Bestäubungsökologie bewirken). Das ist zum einen im aktuellen zeitlichen Rahmen des Projektes KLIBAU nicht realisierbar, zum anderen fehlen weitreichende Forschungsergebnisse zu speziellen Bereichen auf die weiter unten eingegangen wird. Aufgrund der Komplexität einer Artenauswahl und der wenigen wissenschaftliche Daten, die momentan hierzu zur Verfügung stehen, kann nur eine potentielle Pflanzenliste postuliert werden, die aufgrund verschiedener Kriterien wie Lebensraum, Ökologie (z.B. Zeigerwerte nach Ellenberg/Dierschke (2010), Gefährdung, biologische Merkmale (z.B. Behaarung bzgl. Feinstaubabscheidung), und Wechselbeziehungen im Nahrungsnetz (z.B. Futterpflanze für Insekten) das Potential einer positiven Klima- und Umwelteinwirkung beinhaltet. Weitere Förderungen zur Adressierung der fehlenden Bereiche müssten für mehrere Jahre erfolgen, um sowohl die Pflanzenarten als auch ihre Zusammensetzung, Pflanzengemeinschaft und Pflanzengesellschaft und entsprechende Ökosystemdienstleistungen gesichert empfehlen zu können. Da die bereits erwähnte Webseite „Artenfilter“ (DBU 2009) schon existiert, auf der die regionalen Arten u.a. für „Regiosaatgut“ gelistet sind, kann sich der Praktiker aktuell dort informieren. Für den vorliegenden Endbericht des Forschungsprojektes KLIBAU wird für urbane Begrünungen eine Positiv-Liste entwickelt. Des Weiteren werden allgemeine Formulierungen als Empfehlungen verwendet (z.B. „... nur gebietseigene Arten...“ oder „...Verzicht auf Zuchtarten, gebietsfremde Arten potentiell invasive, invasive und Neophyten...“), als auch auf die Zusammenstellungen der invasiven und potentiell invasiven Arten des Bundesbauministeriums (BMUB 2016c Anlage 4) und der Länder verwiesen. Grundlage können hier die existierenden Listen von Deutschland sowie der Länder der potentiellen Einwanderung Schweiz, Österreich und Frankreich sein (Schwarze Liste, Watch-List, Liste der invasiven Arten,...). Die entwickelten Positiv-Pflanzenlisten finden sich in Kapitel 8.9.

## 8.5. Sensitivitätsanalyse Klima- und Umweltpotentiale durch Begrünung

### 8.5.1. Entwicklung einer Sensitivitätsanalyse

Um das Projektziel zu erreichen gilt es, nicht nur biologische Maßnahmen mit hoher Widerstandsfähigkeit gegenüber den genannten Einwirkungen zu entwickeln, sondern gleichzeitig positive Klima- und Umweltpotentiale zu erschließen sowie auf die Nachhaltigkeit zu achten. Dazu müssen im Projekt mehrere Ebenen berücksichtigt werden. Die ökologische Qualität hängt dabei von der Vielfalt an Synergien ab, die beispielsweise beeinflusst werden durch bestimmte Arrangements von Pflanzenarten, ihren Funktionen und Interaktionen, Pflanzenkompositionen, Substrateigenschaften, Strukturvielfalt, Stabilität der Pflanzengesellschaft / Biozönose, deren räumlichen Vernetzung als künstliches und natürliches Ökosystem (Zimmermann 1987) sowie dem Mikroklima und regionalen Makroklima (z.B. Lundholm 2015; Santamouris 2014; Norton et al. 2015; Bowler et al. 2010). Ziel ist es, nicht nur eine Konstruktion mit maximaler Resilienz zu entwickeln, sondern eine Bandbreite an Lösungen aufzuzeigen, die von erhöhter Widerstandsfähigkeit mit mindestens einem Klima- und Umweltpotential bis hin zu maximaler Resilienz mit mehreren Klima- und Umweltpotentialen reichen.

Die Wertigkeit von Systemen wird meist definiert durch die Vielfalt. Vielfältige Systeme z.B. durch Strukturvielfalt, Artenvielfalt, Wuchsformkombinationen, funktionelle Vielfalt führen meist zu stabileren, nachhaltigeren und ästhetischeren Systemen. So eröffnet zum Beispiel die Strukturvielfalt mit zahlreichen unterschiedlich gestalteten räumlichen Nischen eine Vielzahl von physikalischen und biologischen Refugien, die insbesondere genutzt werden, wenn die mikro- bis makroklimatischen Verhältnisse ungünstige Parameter wie extreme Hitze oder Kälte bieten (Lundholm 2015). Flachdächer und Außenanlagen z.B. können mikroklimatisch negative Effekte durch versiegelte Flächen, Kiesschüttungen oder sterile Schottergärten aufweisen. Diese vermindern die Regenwasserretention durch fehlende strukturelle oder biologische Vielfalt und stellen ein biologisches Grab für Biodiversität dar (van Woert et al. 2005). Vor allem die im Bauteil absorbierte Wärme führt zu zusätzlichen Wärme- und Hitzequellen und starker Verdunstung. Begrünungen, die eine hohe strukturelle Vielfalt aufweisen, wie zum Beispiel verschiedene Gehölzformen, blumenreiche Wiesen, trocken-heiße Mikrohabitate mit Steinen, Totholzlebensräume und gestaltungsreiche Feuchtbiotope bieten hingegen eine Vielzahl an Strukturen und Funktionen und fördern die Diversität und Bereitstellung von Refugien für unterschiedlichste Ansprüche. Sie fördern aber nicht nur die biologische Vielfalt, sondern auch Regenwasserretention, Wärmepufferung, mechanische Pufferung von Sturm und Hagel. Des Weiteren bieten sie Vernetzungspotentiale mit anderen Biotopinseln als Trittsteinbiotope oder vernetzen über natürliche Strukturen (Hecken, Wildblumenstreifen, Gewässer, usw.) den Umgebungsbe- reich und deren Biotope zu einem zusammenhängenden Netzwerk von miteinander kommunizierenden und sich gegenseitig stabilisierenden Biotopen. Um die Vielzahl an verschiedenen Wirkfaktoren bezüglich Struktur, Pflanzenvegetation und Synergien zu erfassen und deren Beurteilung für eine Sensitivitätsanalyse differenziert betrachten zu können, wird eine Matrix erstellt, die die wichtigsten Parameter auflistet. Das Matrixkonzept beinhaltet die Klima- und Umweltpotentiale und wird jeweils bezüglich der Bereiche Dach, Fassade und Außenanlagen getrennt betrachtet.

### 8.5.2. Dachbegrünung

In nordischen Ländern besitzen Dachbegrünungen beispielsweise in Form von Grassoden eine jahrhundertalte Tradition insbesondere im Kontext der Wärmedämmung. In Deutschland entwickelte sich aus ästhetisch-ökologischer Motivation erst seit den 1980er Jahren der Einsatz von Dachbegrünungen. 1990 wurden die ersten Empfehlungen der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) bzgl. Design und Konstruktion veröffentlicht und inzwischen mehrmals überarbeitet (FLL 2018a). Aktueller Hintergrund zu der Verknüpfung von technischen Systemen der Architektur mit biologischen Systemen, die an Konzepte der Ökosysteme angelehnt sind, ist der gesamtgesellschaftliche Mehrwert, der sich sowohl in monetären Einsparungspotentialen (z.B. Castleton et al. 2010) als auch in Ökosystemleistungen

widerspiegelt (z.B. Lundholm et al. 2010; Francis/Jensen 2017; van Mechelen et al. 2015). Die grundsätzliche Idee dieses Mehrwerts geht auf die Entwicklung von artifiziellen "Neuen Ökosystemen" (novel ecosystems) zurück (Hobbs/Norton 1996; Hobbs et al. 2006). Diese artifiziellen Ökosysteme sollen einen gesellschaftlichen und produktiven Mehrwert schaffen. Des Weiteren besitzt die ästhetische Gestaltung des urbanen Raums eine Teilkomponente, in deren Kontext Dachbegrünungen und Fassadenbegrünungen erprobt wurden und weiterentwickelt worden sind - beispielsweise auch in Bestrebungen der autarken und regionalen Nahrungsmittelversorgung durch urbane Dachgärten. Die Entwicklung war daher zunächst von Seiten der Architektur und des Landschaftsbaus geprägt (Oberndorfer et al. 2007; Pfoser et al. 2013), während in den letzten Jahren die Konzepte mit Anlehnung an vergleichbare Ökosysteme (Kühn/Brandl/Klotz 2004; Kowarik 2011) und urbane Ökosystemfunktionen betrachtet werden (Lundholm et al. 2010). Dach- und Fassadenbegrünungen werden somit auch als Aspekte der Adaption und Mitigation an den Klimawandel begriffen. Sie werden zudem als „natürliche Lösungen“ (engl. „natural based solutions“) (Kabisch et al. 2017) oder funktionelle Ökosystem vorgeschlagen, um neben dem Trend zur Grünen Stadt auch Ziele der Convention on Biological Diversity (CBD) als auch der Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) zu adressieren.

### Stand der Wissenschaft

Es existieren zurzeit eine Vielzahl an unterschiedlichen nationalen und internationalen Veröffentlichungen sowie Richtlinien zu Dach- und Fassadenbegrünungen (Dvorak/Volder 2010; Santamouris 2014; Catalano et al. 2018), die sich teils gegenseitig widersprechen (z.B. im Hinblick auf die Verwendung von Moosen, die besondere Leistungen im Kontext der Regenwasserspeicherung, Evaporationskühlung und Feinstaubakkumulation eröffnen). Dies erfordert eine systematische Aufarbeitung und ganzheitliche Beurteilung, um diese in die Handlungsempfehlungen einfließen lassen zu können. Dies wurde im Projekt kontinuierlich verfolgt, ohne den Anspruch zu haben, vollständig zu sein. Des Weiteren wird der Naturschutzgedanke weitergeführt. Insbesondere eine gezielte Ex-Situ Ansiedlung und die damit verbundene Biodiversitätserhöhung gefährdeter Arten werden erstmals als innovatives Dachbegrünungskonzept in das Projekt integriert (vgl. Kapitel 8.3 und 8.4). Allgemein wird bei der Artenauswahl nicht nur auf potentiell invasive Arten explizit verzichtet, sondern nur heimische bis regionale (gebietseigene) Wildpflanzen verwendet. Dies entspricht dem Konzept der Schweizer Norm für Dachbegrünungen (SN 564312, SIA 312: 2013) als auch der "Berliner Strategie zur Biologischen Vielfalt" (Kowarik/Bartz/Cloos 2012) und wird ebenfalls in der FLL-Richtlinie (FLL 2008) für Dachbegrünungen nach Vorgabe des Naturschutzes oder als Beitrag zur Artenvielfalt begrüßt. Die innovative Strategie, mittels Dachbegrünungen gefährdete Pflanzengesellschaften im sogenannten ex-situ-Verfahren zu schützen und damit Trittsteinbiotope für eine Ausbreitung zu schaffen, beruht auf dem Ansatz, gefährdete Arten und ihre Diversität zu schützen. Dies geschieht beispielsweise durch Renaturierungsflächen, botanische Gärten oder Arboreta, in denen die Arten außerhalb ihres natürlichen Habitats aufgezogen werden (IUCN 2014) (vgl. Kapitel 8.6). Der Anbau und die Erhaltung gefährdeter Wildpflanzen außerhalb ihres natürlichen Lebensraumes (ex situ) sind eine Möglichkeit das Aussterben von Arten zu verhindern. Je nach Situationen können ex situ vermehrte Arten wieder in natürlichen Lebensräumen angesiedelt werden. Insbesondere bieten Dachbegrünungen strukturelle und abiotische Ähnlichkeiten zu den natürlich vorkommenden Pflanzengesellschaften der Schutt-, Felsspalten- und Mauerfugen-Gesellschaften (Klasse: *Asplenieta trichomanis*). Zu diesen Pflanzengesellschaften werden sowohl einige Pflanzenassoziationen in der Roten Liste der Pflanzengesellschaft (Rennwald 2000) als auch Biotope in der "Roten Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands" (Finck et al. 2017) als stark gefährdet bis von vollständiger Vernichtung bedrohten Status zugeordnet. Diese Pflanzengesellschaften sind gekennzeichnet durch aktuell abnehmende Entwicklungstendenzen und nur bedingte Regenerierbarkeit (innerhalb etwa 15 Jahren). Diese Pflanzengesellschaften besitzen somit einen hohen Gefährdungsgrad und bedürfen einem dringenden Schutz, der je nach Region auf Dachbegrünungsflächen implementiert werden und zum Erhalt der Biodiversität beitragen könnte.

## Sensitivitätsanalyse Strukturvielfalt

Tabelle 75: Sensitivitätsanalyse der Maßnahme "Dachbegrünung" zum Aspekt der Strukturvielfalt. Die Beurteilung der Reduktion der Vulnerabilität bezüglich Synergien, die durch Begrünung für das Gebäude entstehen, wurde in fünf Kategorien (stark negativ, negativ, neutral, positiv und stark positiv) eingeteilt (von -2 bis +2)

		Strukturvielfalt					
		Substratstärke	Substratqualität	Variation Substrathöhe	Vegetationsfreie Flächen	temporäre Wasserflächen	Einzelmaßnahmen
<b>Widerstand gegen Klimawandelfolgen:</b>							
	Starkregen	2	2	2	-1	2	1
	Hagel	1	0	0	-1	0	1
	Hitze/Trockenheit	2	2	2	-1	2	1
	Sturm / Böen	1	0	1	0	0	1
<b>Klimapotentiale:</b>							
	Regenwasserretention	2	2	2	0	2	0
	Mikroklima	2	2	2	-1	2	2
<b>Klimapotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>		<b>10</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>-4</b>	<b>8</b>	<b>6</b>
<b>Umweltpotentiale:</b>							
	Feinstaubbindung	0	0	1	0	1	0
	Biodiversität (Flora)	2	2	2	2	2	2
	Biodiversität (Fauna)	2	2	2	2	2	2
	Naturschutz	2	2	2	2	2	2
	Positive Wechselwirkung					PV	
<b>Umweltpotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>		<b>6</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>6</b>
<b>Gesamtpotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>		<b>16</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>12</b>

Die Strukturvielfalt wird dabei in die Teilaspekte Substratstärke, Substratqualität, "Variation Substrathöhe", "Vegetationsfreie Flächen", "temporäre Wasserflächen" und "Einzelmaßnahmen" eingeteilt und wie folgt erklärt.

### Variation Substrathöhe

Die Variation bzw. Modulation der Substrathöhe wird beispielsweise gebildet durch Anhögelungen, frostfreie Rückzugsorte, Nischen von denen aus Neubesiedelung nach Dürre- oder Frostschäden erfolgt (Regenwürmer benötigen z.B. mind. 20 cm).

### Vegetationsfreie Flächen

Viele Insekten benötigen offenen Boden, zum Beispiel Sand- oder Lehmlinsen, bindigen Rohboden oder auch Kiesbereiche, Grobkiesbeete, Schotterflächen und Natursteinhaufen. Hier können räuberische Arten wie Laufkäfer oder Springspinnen jagen, andere Arten brauchen diese Bereiche als Sonnenplätze oder zur Anlage ihrer Bodennester. Ritzen und Nischen zwischen Steinen dienen als Versteck oder Schattenplatz. Da unterschiedliche Arten auch unterschiedliche Ansprüche haben, sollte auf verschiedene Bodenbeschaffenheiten geachtet werden, damit möglichst verschiedene Nischen zur Verfügung stehen. Sandig-lehmige Bereiche können der Anlage von Bodennestern von Wildbienen dienen, kiesige Bereiche können Jagdrevier für Spring- und Wolfspinnen sein.

### Temporäre Wasserflächen

Ein Gründach ist so konzipiert, dass Wasser möglichst schnell abläuft, denn Stauässe schadet der Vegetation. Andererseits erhöht die Verfügbarkeit von Wasser die Attraktivität eines Dachs für Vögel und Insekten enorm. An einzelnen Stellen der Dachfläche können daher Folien eingearbeitet und mit Sand abgedeckt werden, so dass sich Regenwasser lokal über einen längeren Zeitraum auf dem Dach hält. Solche Pfützen oder Wassertränken dienen als Badestelle und Trinkgelegenheit für viele Tierarten, und sie schaffen ein feucht-kühles Mikroklima in einem ansonsten heißen und trockenen Lebensraum.

Die temporären Wasserflächen können auch evtl. als Kühlung von PV und damit höheren Energieertrag durch bessere Effizienz genutzt werden. Bei diesen Wasserflächen geht es um Pflanzengrößen mit ca. 2 - 10 cm Höhe und nicht um Teichanlagen. Letzteres wäre ein Retentionsdach mit temporärer bis permanenter Wasserfläche (siehe Sonderformen – Retentionsfläche).

### Einzelmaßnahmen

Einzelmaßnahmen sind einzeln durchgeführt Aktionen wie z.B. die Ausbreitung von Heumulch (Wildkräuteranimpfung), Totholz, Steinhaufen, windsichere Nisthilfen für Insekten (z.B. Wildbienenhotel, Florfliegenkasten, Hummelburg) Fledermäuse und Vögel, Bepflanzung mit bestimmten Nahrungspflanzen für Bienen, Schmetterlinge oder Vögel etc.

### **Sensitivitätsanalyse Sonderformen**

Tabelle 76: Sensitivitätsanalyse der Maßnahme "Dachbegrünung" zum Aspekt der Sonderformen. Die Beurteilung der Reduktion der Vulnerabilität bezüglich Synergien, die durch Begrünung für das Gebäude entstehen, wurde in fünf Kategorien (stark negativ, negativ, neutral, positiv und stark positiv) eingeteilt (von -2 bis +2)

	Sonderformen			
	Retentionsfläche	Nutzgärten	Rasenbegrünung	Solar-Anlagen (PV, ST)
<b>Widerstand gegen Klimawandelfolgen:</b>				
Starkregen	2	1	1	0
Hagel	1	1	1	-1
Hitze/Trockenheit	2	1	1	1
Sturm / Böen	1	1	1	-2
<b>Klimapotentiale:</b>				
Regenwasserretention	2	2	2	1
Mikroklima	2	2	1	2
<b>Klimapotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>				
	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>1</b>
<b>Umweltpotentiale:</b>				
Feinstaubbindung	1	1	1	0
Biodiversität (Flora)	2	"-1 bis +1"	-2	2
Biodiversität (Fauna)	2	"-1 bis +1"	1	2
Naturschutz	2	0	1	2
<b>Umweltpotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>				
	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>6</b>
<b>Gesamtpotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>				
	<b>17</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>7</b>

Bei den Sonderformen im Bereich der Dachbegrünung handelt es sich um zweckgebundene Gewerke, die eine Spezialisierung des Gründaches darstellen. Beispiele hierfür sind z.B. Retentionsflächen, Nutzgärten, Rasenbegrünung (Dachgärten) und "Solar-Gründächer" mit Solar-Anlagen (Photovoltaik, Solarthermie). Die Sonderformen sollen im Projekt nicht explizit bearbeitet, aber zumindest miterwähnt werden.

### Retentionsfläche

Ein Retentionsdach besitzt temporäre bis permanente Wasserflächen, die sich zumeist aus Regenwasser bzw. Grauwasser speisen und in der Regel als nicht offene Wasserflächen unterhalb des Substrats mittels Drainage und Wasserspeicherelementen oder Wasserrückhalteelementen (z.B. Mäander- oder Drossелеlemente) Regenwasser zurückhalten (meist Kombination aus Anstaudach und gedrosseltem Wasserablauf). Damit werden sowohl der Spitzenabfluss reduziert als auch der Vegetation langfristig Wasser zur Verfügung stellen. Es gibt aber auch Retentionsdächer mit kleinen offenen Teichen.

### Rasengrünungen

Dachbegrünungen werden häufig auch integriert und als begrünte Terrasse oder begrünter Dachgarten genutzt. Die Bepflanzungen reichen hierbei von kleinräumigen Nutzungsbepflanzungen (Sichtschutz, Beschattung, Windschutz,...) über Rasenflächen bis zu Freizeitgärten mit Büschen und Bäumen. Steht die Nahrungsmittelproduktion im Vordergrund werden im Sinne des Urban Gardening häufig Hochbeete oder andere Beetanlagen eingebunden.

### Solaranlagen

Bei Solar-Gründächern ist Photovoltaik und extensive bis intensive Dachbegrünung im gegenseitigen Nutzen kombinierbar. Durch Kühleffekte der Begrünung aufgrund von Verdunstungskälte steigert sich die Effektivität der Photovoltaikanlage und amortisiert sich aufgrund des Leistungsgewinns schneller. Dem gegenüber stehen natürlich die deutlich höheren Investitionskosten. Verschiedene Bepflanzungsarten müssen dabei beispielsweise zur Verhinderung von Beschattung der PV-Anlage berücksichtigt werden. Es existieren allerdings auch bisher noch nicht berücksichtigte Alternativen zu Erhöhung von Kühleffekten, wie die Verwendung von Moosen mit hoher Wasserhaltekapazität und kühlender Evaporationsleistungen oder durch Regenwasser gespeiste temporäre offene Wasserbereiche unterhalb der PV-Module. Auch die Beschattung durch die PV-Module wirken sich auf das Mikroklima, die Vegetation und damit auch auf die Gebäudehülle aus. Zu diesen Bereichen besteht noch dringender Forschungsbedarf. Des Weiteren existieren Systemlösungen, die mit der Last des Begrünungsaufbaus die Photovoltaikaufständerungen lagesicher auf dem Dach fixieren, ohne in die Dachabdichtung einzugreifen (vgl. Kapitel 7.7.1). Allerdings muss bei zunehmenden Sturmereignissen auch die deutlich erhöhte Windlast durch den Widerstand der PV-Module Berücksichtigung finden.

### **Pflanzenauswahl Dachbegrünung**

Für Dachbegrünungen werden verschiedene Pflanzenarten von Saatgutmischungen über Sprosssteile und Setzlinge bis ganze Begrünungsmatten zur Auswahl angeboten. Die Auswahl der Arten erfolgt meist auf empirischen Erfahrungswerten (z.B. FLL 2018a) oder unter ästhetischen Gesichtspunkten. Verschiedene Aspekte, die im klimaangepassten Bauen insbesondere für Klima- und Umweltpotentiale eine bedeutende Rolle spielen, finden in den aktuellen Listen kaum Beachtung. So werden beispielsweise nicht heimische Pflanzen und Zuchtformen aufgelistet und angeboten. Es ist bekannt, dass bei Zuchtformen und Hybriden häufig sowohl die Staubblätter, die Nektarblätter (florale Nektarien) als auch die Fruchtblätter (Megasporophyll) mit u.a. den fertilen Abschnitten der Samenanlagen (Fruchtknoten bzw. Ovar) zu Gunsten der attraktiveren aber sterilen Kronen- und Kelchblätter durch Zuchtverfahren reduziert werden. Das führt zwar evtl. zu ästhetischeren Blütenformen, doch gleichzeitig werden die Blüten unattraktiver für Tiere, da sowohl die Pollen- und Nektarproduktion geringer ist, als auch die Anzahl und Größe von Früchten reduziert sind. Einige Zuchtformen sind sogar steril oder haben sogenannte gefüllte Blütenstände. Sie weisen daher keinen ökologischen Mehrwert (Pollenangebot, Nektarproduktion, Früchte) für Tiere auf und beeinflussen die Wechselbeziehungen mit Nahrungsnetzen (z.B. Futterpflanze für Insekten) und damit das Umweltpotential Biodiversität negativ. Das Auswahlkriterium "Nektarproduktion" oder "Fruchtproduktion" wird erst seit wenigen Jahren, vor allem seitens des Umweltschutzes, adressiert. Von Seiten der Umweltschutzverbände (z.B. Netzwerk Blühende Landschaft; Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland) oder Ministerien (BMUB 2016c) werden immer mehr Listen beispielsweise mit potentiellen Wildpflanzen als Nektar- und Pollenspender, Schmetterlingsstauden oder Vogelnährgehölze publiziert. Auch weitere Synergien der Ökosystemdienstleistungen von Pflanzen, wie z.B. eine höhere Feinstaubabscheidung durch beispielsweise raue Blattoberflächen und Behaarungen (Sæbø et al. 2012; z.B. Weber/Kowarik/Säumel 2014; Janhäll 2015) werden bisher nicht explizit berücksichtigt. Zu dem Potential verschiedener Pflanzen, Feinstaub abzuscheiden gibt es für die heimische Flora ebenfalls sehr wenige Publikationen (Flohr 2011). Die Kombination der Kriterien, die synergetisch auf das klimaangepasste Bauen wirken sollen mit der aktuell wenig wissenschaftlich gesicherten Datengrundlage, die meist auch nur einzelne Kriterien adressieren und nicht im gewünschten synergetischen Zusammenhang stehen, ist sehr speziell. Auf Grundlage dieser

Kombination wurde eine potentielle Pflanzenliste erstellt und in diesem Bericht postuliert. Die Pflanzenliste stellte aufgrund der geforderten Kriterien eine noch erweiterbare erste Pflanzenempfehlung dar. In der Pflanzenliste werden u.a. folgende Kriterien berücksichtigt:

- natürlicher Lebensraum,
- Ökologie (z.B. ökologische Zeigerwerte nach Ellenberg/Dierschke (2010): insbesondere Halblichtpflanzen bis Volllichtpflanzen, Wärmezeiger, Trocknis- bis Starkrockniszeiger, Stickstoffarmutzeiger),
- Gefährdung (Einstufung in Rote-Liste-Kategorien),
- biologische Merkmale (z.B. Behaarung bzgl. Feinstaubabscheidung, Pfahlwurzeln bzgl. Wasserverfügbarkeit in Außenanlagen),
- Wechselbeziehungen im Nahrungsnetz (z.B. ein durchgehendes Blühangebot, Futterpflanze für Insekten, Wirtspflanze für gefährdete oder seltene Tierarten).

Somit wurde eine Pflanzenliste mit möglichst vielfältigen Potentialen einer positiven Klima- und Umwelteinwirkung bereitgestellt (vgl. Tabelle 83, Tabelle 85 und Tabelle 86). Die Pflanzenliste stellt einen Vorschlag für extensive bis semi-intensive Dachbegrünungsflächen unter Berücksichtigung von Biodiversitäts- und Feinstaubabscheidungsfördernden Synergien dar. Das erste Kriterium der Auswahl war, dass die Pflanzen auf einer extensive Dachbegrünung überleben würden. Als zweitwichtigstes Kriterium war die Biodiversität entscheidend, insbesondere die Unterstützung von Wildbienen, Honigbienen und Schmetterlingen, die Nahrungspflanzen, aber natürlich auch anderen Insekten Nektar und Pollen liefern. Ein weiteres Kriterium ist, dass die Pflanzen einheimisch sind oder in Ausnahmefällen, wenn sie besonders positiv die Biodiversität oder Feinstaubabscheidung fördern, als Neophyten bereits eingebürgert sind, ohne potentiell invasiv oder invasiv zu sein. Nach Gefährdungs- beziehungsweise Feinstaubabscheidungs-Potentialen konnte aufgrund von fehlenden wissenschaftlichen Untersuchungen nicht speziell selektiert werden (von vielen der vorgeschlagenen Arten liegen leider keine Feinstaubmessungen vor). Durchaus wurde jedoch das Vorhandensein von Haaren bzw. Oberflächenvergrößerung oder Gefährdungsstand und damit Synergien involviert. Der Vorschlag der Pflanzenauswahl ist modifiziert u.a. nach Empfehlungen von

- Deutsche Wildtier Stiftung (2019),
- Westrich (1997),
- BfN (2019) und
- BMUB (2016).

### 8.5.3. Fassadenbegrünung

Die Fassadenbegrünung wurde viele Jahrzehnte unter ästhetischen und seit den 1990er auch unter ökologisch faunistischen Aspekten betrachtet (Bartfelder/Köhler 1987; Althaus/Kiermeier/Schuppler 1991; Köhler 1993; Mann 1996). Im Kontext des Klimawandels und des klimaangepassten Bauens jedoch rücken weitere synergetische Aspekte insbesondere die Gebäudeklimatisierung, der Schutz vor Hagel und UV-Strahlung der Fassadenmaterialien, Potentiale der Regenwasserretention sowie die Feinstaubabscheidung in den Vordergrund (Pfoser et al. 2013). Die Fassadenbegrünung ist auch aufgrund der höheren Oberfläche anfälliger für Hagel und Sturmangriffe und es existieren aktuell noch keine Hagelprüfungen für fassadengebundene Begrünungssysteme. Es sollte somit bei der Planung von Fassadenbegrünung darauf geachtet werden, dass die zusätzliche Windlast durch vergrößerte Windangriffsfläche Berücksichtigung findet, sowie die wandgebundenen Systeme aus hagelgeprüften Materialien bestehen.



Für die projizierten länger andauernden Hitzeperioden sowie die höheren Sommertemperaturen spielen insbesondere die Kühleffekte eine wichtige Rolle. Reflektion und Absorption der Sonneneinstrahlung sowie Gebäudeverschattungen durch vorgelagerte Vegetation als auch adiabate Kühlung durch Verdunstungskälte der Pflanzen bewirken eine signifikante Reduktion der Oberflächentemperatur (Bowler et al. 2010; Norton et al. 2015; Brune/Bender/Groth 2017). Durch den Luftwiderstand der Blattoberflächen und die entstehenden Luftpolster kann zudem eine Dämmwirkung erzielt werden. Ein weiterer Aspekt der Fassadenbegrünung ist der Materialschutz, da die Vegetation Fassaden sowohl vor Schadstoffen und Verschmutzung schützt, als auch die Einflüsse von ultravioletter Strahlung, Hagel, Wind, Starkregen und Temperaturextremen vermindert und dadurch die Lebensdauer der Fassadenmaterialien verlängert. Allerdings führt ein bodengebundener Selbstkletterer auch zu einer zusätzlichen Belastung der Fassadenoberfläche. Je nach gewählter Bewässerungsstrategie (bodengebundene vs. wandgebundene Begrünung, vgl. Kapitel 7.5.6) trägt die Fassadenbegrünung zur Regenwasserretention und Regenwasserverdunstung bei. Insbesondere aber die Abscheidung von Feinstaub und Luftschadstoffen wird aktuell diskutiert (Abhijith et al. 2017). Die gleichzeitige Lärmreduktion ist zudem besonders in Straßennähe ebenfalls kein zu vernachlässigender Aspekt, auch wenn mit künstlichen Systemen häufig eine höhere Lärmreduktion erreicht werden kann.

### Stand der Wissenschaft

Seit den letzten 20 Jahren wird international an Fassadenbegrünungen, sowohl theoretisch simulierend als auch experimentell, geforscht (z.B. Francis/Lorimer 2011; Russo et al. 2017; Besir/Cuce 2018). Die Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) hat in Zusammenarbeit mit Prof. Nicole Pfoser der Hochschule Nürtingen die Kombinationsmöglichkeiten von diversen Fassadenaufbauten mit unterschiedlichen Pflanzenarten analysiert und in der FLL-Fassadenbegrünungsrichtlinie zusammengefasst (Pfoser et al. 2013; Pfoser 2016, 2018; FLL 2018b). Ebenso wurde ein Quantifizierungsansatz zu wandgebundenen Begrünungen veröffentlicht (Köhler/Nistor 2018; siehe dazu auch Perini/Rosasco 2013). Auch seitens der Bundesministerien rückte das Thema in ein größer werdendes öffentliches Interesse (BMUB 2017; Hansen/Born 2018; BBSR 2019b, 2019a; Schmauck 2019). Insbesondere als mögliche Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels (Brune/Bender/Groth 2017) und mit weiteren Synergien als neue vertikale Produktionsflächen finden fassadengebundene Begrünungsformen aktuell große Aufmerksamkeit (Hemrich/Blaschitz/Wurm 2014; Wurm et al. 2016; Schmidt/Nguyen/Lakatos 2017b, 2017a; Lakatos/Strieth 2018; Scherer et al. 2018; Schmidt/Herrmann/Lakatos 2019). Im Kontext des Klimawandels wurden Fassadenbegrünungen insbesondere bezüglich ihrer Kühlleistungen für Gebäudeoberflächen untersucht. So konnten Temperaturerniedrigungen von 2 bis 13 °C an der Fassade gemessen werden (Cuce 2017; Kokogiannakis et al. 2019). Dies deutet auf eine ungefähre Einsparung des Primärenergiebedarfs zur Kühlung des Gebäudes von ca. 22 kWh m<sup>2</sup>/a und eine durchschnittliche Verdunstungskälte von ca. 280 kWh pro Tag hin (Schmidt 2006; Dettmar/Pfoser/Sieber 2016). Die Funktion zur Wärmeregulierung hängt dabei stark von der Intensität und Ausrichtung der Pflanzen ab (ca. 85 - 95 % Verschattung kann durch Gerüstkletterpflanzen und bis zu 100 % Verschattung durch wandgebundene Bauweisen erreicht werden). Die Klimapotentiale sowie technische und organisatorische Aspekte der Fassadenbegrünung sind somit gut dokumentiert und in der Tabelle 77 bzgl. Eignungsübersicht und Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Pflanzenkletterformen und Fassadentypen zusammengestellt (FLL 2018b; Brune/Bender/Groth 2017). Andere Aspekte jedoch wie z.B. die Erhöhung der Biodiversität oder der Feinstaubabscheideeffizienz durch Fassadenbegrünung wurden bisher selten experimentell untersucht. Entsprechend der klimaangepassten Zielsetzung müssen daher auch Kriterien mit Umweltpotentialen an eine zu empfehlende Pflanzenliste für eine Fassadenbegrünung gestellt werden.

Tabelle 77: Eignungsübersicht und Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Pflanzenkletterformen und Fassadentypen, nach FLL (2018b) Tabelle 3

Wandaufbau			Begrünung							
			bodengebundene Begrünung				wandgebundene Begrünung			
			Selbstklimmer	Gerüstkletterpflanzen			nicht kletternde Begrünung			
				Wurzelkletterer / Haftschleibenranker	Schlinger/Winder	Ranker	Spreizklimmer	Stauden	Kleingehölze	Moose
Ungedämmte Außenwände	Massive Wandaufbauten	Ortbeton- und Betonfertigteilewände / Sichtmauerwerk-Fassaden	+	+	+	+	+	+	+	
		Beton- oder Mauerwerkswände mit Deckbelag	+	+	+	+	+	+	+	
	Ständer- u. Fachwerk	Holzskelett- oder Metallskelett-Bauweise	-	±	±	±	±	±	±	
		Vorfassaden mit Glas- oder Kunststoffelementen	-	±	±	±	±	±	±	
		Vorfassade als Folienkonstruktion	-	±	±	-	±	±	±	
		Wärmedämmbeton	±	±	±	±	±	±	±	
Massive Wandaufbauten	Leichtbeton - oder porosiertes Ziegel-Mauerwerk	-	±	±	±	±	±	±		
	Beton- oder Mauerwerkswände mit Deckbelag	+	+	+	+	+	+	±		
	Ständer- und Fachwerkbauweise	Glas- oder Kunststofffassaden	-	+	+	+	±	±	±	
		Folienkissen-Konstruktionen	-	±	±	-	±	±	±	
		Sandwichpaneele	-	+	+	+	+	+	+	
		gedämmte Fachwerkwände / Pfosten-Riegelbauweise mit Strohlehmausfachung	-	+	+	+	+	+	±	
Gedämmte Außenwände	Mehrschalige nicht hinterlüftete Wandaufbauten	Mit Kerndämmung	Außenschale aus Ortbeton oder Beton-Fertigteilen / Sichtmauerwerk-Außenschale	±	+	+	+	+	+	±
			Außenschale aus Mauerwerk oder Beton, zusätzliche Sichtbelegung	±	+	+	+	+	+	±
			Außenschale aus Mauerwerk oder Beton, zusätzlicher Außenputz	+	+	+	+	+	+	±
	Mehrschalige hinterlüftete Wandaufbauten	Mit Außen-dämmung	Wärmedämmverbundsystem (WDVS) auf tragender Wand	-	±	±	±	±	±	±
			Transparente Wärmedämmung (TWD) vor wärmespeichernder Massivwand	-	±	±	±	±	±	±
	Mehrschalige hinterlüftete Wandaufbauten		Massive Außenschale aus Ortbeton oder Betonfertigteilen / Massive Außenschalen aus Sichtmauerwerk	±	±	±	±	±	±	±
			Außenschalen aus Stein, Holz- oder Holzwerkstoffen / Vorsatzschalen aus Metall, Kunststoff, Glas oder Verbundwerkstoffen	-	±	±	±	±	±	±
			Verbundpaneele mit Photovoltaik	-	-	-	-	±	±	±
			Folien-Vorfassaden	-	±	±	-	±	±	±
	Luftkollektor-Fassade	Transparente Ausführung	Glas-, Kunststoffglas-Vorfassaden	-	±	±	±	±	±	±
			Folien-Vorkonstruktionen	-	±	-	-	±	±	±
		Lichtdichte Ausführung	Absorptions-optimierte Metalblech-Oberflächen	-	±	±	±	±	±	±
<i>Keramische Materialien, Naturwerkstein-, Betonwerkstein-, Kunststeinplatten und Verbundwerkstoffe in Forschung!</i>			-	±	±	±	±	±	±	

## Sensitivitätsanalyse Fassadenbegrünung

Als Fassadenbegrünung wachsen grundsätzlich viele Pflanzenarten, die sich auch als Balkonbepflanzung eignen würden. Aus klimaangepasster Sicht sind aber alle Pflanzenarten interessant, die klettern und möglichst flächig die Fassade bedecken können, wie Selbstklimmer (z.B. Efeu, Jungferhrebe), Schlinger/Winder (z.B. Hopfen, Zaunrübe, Zaunwinde) und Ranker (z.B. Waldrebe). Wichtig ist dabei einerseits die flächige Biomasse, die zahlreiche Klima- und Umweltpotentiale beeinflusst und die technische Umsetzung, die insbesondere Einfluss auf die Regenwasserretention und die Beschattung hat. Andererseits zeigt sich aber auch die vertikale Vernetzung der Dachbegrünung mit der Außenanlage von Bedeutung, die insbesondere den weniger mobilen Tiere (z.B. Spinnentiere und flügellose Insekten) die Möglichkeit gibt, größere urbane Begrünungsflächen zu erschließen.

Tabelle 78: Sensitivitätsanalyse der Maßnahme "Fassadenbegrünung" zum Aspekt der Strukturvielfalt. Die Beurteilung der Reduktion der Vulnerabilität bezüglich Synergien, die durch Begrünung für das Gebäude entstehen, wurde in fünf Kategorien (stark negativ, negativ, neutral, positiv und stark positiv) eingeteilt (von -2 bis +2)

		Strukturvielfalt				
		Bodengebundener Direktbewuchs	Bodengebundener geleiteter Bewuchs	Wandgebundene horizontale Flächen	Wandgebundene vertikale Module	Wandgebundene vertikale Flächen
<b>Widerstand gegen Klimawandelfolgen:</b>						
	Starkregen	0	1	1	2	2
	Hagel	2	1	1	2	2
	Hitze/Trockenheit	2	1	1	2	2
	Sturm / Böen	-1	-1	-1	-1	-1
<b>Klimapotentiale:</b>						
	Regenwasserretention	2	1	2	2	2
	Mikroklima	2	1	1	2	2
<b>Klimapotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>		<b>7</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>9</b>
<b>Umweltpotentiale:</b>						
	Feinstaubbindung	2	1	1	2	2
	Biodiversität (Flora)	1	1	2	2	2
	Biodiversität (Fauna)	2	2	1	2	2
	Naturschutz	2	2	2	2	2
<b>Umweltpotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>		<b>7</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>8</b>
<b>Gesamtpotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>		<b>14</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>17</b>	<b>17</b>

Die Strukturvielfalt wird dabei in die Teilaspekte Bodengebundener Direktbewuchs, bodengebundener geleiteter Bewuchs, wandgebundene horizontale Flächen, wandgebundene vertikale Module und wandgebundene vertikale Flächen eingeteilt (modifiziert nach FLL 2018b).

### Flächenförmiger Direktbewuchs

Ein flächenförmiger Direktbewuchs der Fassade, in dem die Pflanze in den Boden gepflanzt wird und ohne Kletterhilfe auskommt, weist bei einer sich nach einigen Jahren einstellenden flächigen und lückenlosen Bewuchs der Fassade sehr hohe Klima- und Umweltpotentiale auf. Geeignet sind ausdauernde Pflanzen wie Selbstklimmer, Wurzelkletterer und Haftscheibenranker. Dem gegenüber steht ein ebenfalls bodengebundener, leitbarer Bewuchs mit Gerüstkletterpflanzen an separater Wuchskonstruktion (Kletterhilfen oder Spaliere aus Stäben, Röhren, Seilen, Gittern, Netzen), die zwar ebenfalls hohe Klima- und Umweltpotentiale aufzeigen, jedoch meist nicht oder nur mit hohem Aufwand ebenso flächig und lückenlos ausgestaltet werden können wie der Direktbewuchs. Beide Bewuchssysteme werden häufig zur dauerhaften Begrünung genutzt, da die Pflanzenversorgung weitgehend selbständig abläuft. Dadurch ist der Pflege- und Wartungsaufwand gering. Gleichzeitig wird aufgrund des dauerhaften Begrünungseffekts die Ökologie aufgewertet und Klimapotentiale erschlossen (Kühlung, Dämmung, Materialschutz). Im Bereich der Regenwasserretention bieten bodengebundene Systeme allerdings nur eine höhere Oberfläche durch Blätter zur Verdunstung – die Aufnahme von Regenwasser über die Blattoberfläche ist sehr gering.

## Wandgebunde Lösungsansätze

Die zweite Gruppe der Fassadenbegrünungen sind wandgebundene Lösungsansätze. Die Pflanzen stehen bei diesem System nicht in direktem Kontakt zum Bodensubstrat. Horizontale Vegetationsflächen in Pflanzengefäßen mit Substrat in Einzel- oder Linearbehältern an Tragkonstruktionen stellen dabei die einfachsten wandgebundenen Begrünungsarten dar, die jedoch häufig nicht lückenlos, sondern meist offen gestaltet werden und daher geringere Klima- und Umweltpotentiale aufweisen. Hierfür geeignete Pflanzen sind Stauden (u.a. auch Gräser, Farne; bedingt Zwiebel- und Knollengewächse, welche frühzeitig als Frühblüher Nektar und Pollen im Frühling anbieten – siehe kontinuierliches Blütenangebot in Kapitel 8.3), Kleingehölze, Schlinger, Ranker und bedingt Spreizklimmer. Demgegenüber stehen sogenannte "Vertikale Gärten", in denen die Pflanzen in senkrechten Vegetationsflächen entweder modular oder flächig angelegt wurden. Durch die teilweise zu erreichende Lückenlosigkeit können höhere Klima- und Umweltpotentiale erschlossen werden. Bei modularen Systemen werden substrattragende Rinnensysteme als Element-Einheiten aus Gabionen bzw. Körbe, Matten oder Kassetten verwendet. Es gibt auch die Möglichkeit der direkten Begrünung auf Kunst- und Natursteinplatten mit begrünungsfördernder Oberflächenrauheit. Geeignet sind Stauden (u.a. auch Gräser, Farne), Kleingehölze, Moose, Spreizklimmer und unter Umständen Wurzelkletterer. Ähnlich gestaltet sind vertikale Vegetationsflächen mit flächigen Konstruktionen, die entweder mit Substratträger aus Textil-Systemen, Metallblech-Systemen (mit Öffnungen zu Vegetationsflächen aus Textil- bzw. Substratträgern) oder direkt begrünt auf nährstofftragenden Wandschalen ausgeführt werden. Geeignet sind ebenso die bereits erwähnten Pflanzenarten.

Wandgebundene Systeme werden häufig an Gebäuden genutzt an denen kein Bodenanschluss gegeben ist. So können auch Fassaden begrünt werden, die ansonsten ungeeignet wären. Die Auswahl der meist ausdauernden Pflanzen bietet einen breiten Gestaltungsspielraum (daher auch eine höhere floristische Artenvielfalt) und kann eine sehr zeitnahe Flächenwirkung entfalten. Allerdings ist der Pflege- und Wartungsaufwand höher und damit teurer als bodengebundene Systeme. Auch die Wasser- und Nährstoffversorgung sowie Entwässerung müssen sichergestellt werden. Zur Bewässerung kann und sollte Regenwasser verwendet werden (teilweise auch Grauwasser verwendbar), was die Regenwasserretention und geringeren Düngungsaufwand positiv beeinflussen. Mischformen aus boden- und wandgebundenen Fassadenbegrünungen eröffnen durch den enormen Gestaltungsspielraum die höchsten Klima- und Umweltpotentiale, wenn entsprechende Aspekte und Empfehlungen berücksichtigt werden.

Tabelle 79: Sensitivitätsanalyse der Maßnahme "Fassadenbegrünung" zum Aspekt der Pflanzenauswahl und Vernetzung. Die Beurteilung der Reduktion der Vulnerabilität bezüglich Synergien, die durch Begrünung für das Gebäude entstehen, wurde in fünf Kategorien (stark negativ, negativ, neutral, positiv und stark positiv) eingeteilt (von -2 bis +2)

	Pflanzenauswahl					Vernetzung		
	Arten	Biomasse	Wuchsformen	Lebensformen	Funktionalität	horizontal	vertikal	regional
<b>Widerstand gegen Klimawandelfolgen:</b>								
Starkregen	1	2	1	1	1	1	1	1
Hagel	1	2	1	1	1	1	1	1
Hitze/Trockenheit	2	2	1	1	1	1	1	1
Sturm / Böen	1	-2	1	1	0	0	0	1
<b>Klimapotentiale:</b>								
Regenwasserretention	2	2	1	2	2	1	1	2
Mikroklima	2	2	1	2	2	1	1	2
<b>Klimapotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>								
	9	8	6	8	7	5	5	8
<b>Umweltpotentiale:</b>								
Feinstaubbindung	2	2	1	2	2	2	2	2
Biodiversität (Flora)	2	2	1	2	2	2	2	2
Biodiversität (Fauna)	2	2	1	2	2	2	2	2
Naturschutz	2	2	1	2	2	2	2	2
<b>Umweltpotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>								
	8	8	4	8	8	8	8	8
<b>Gesamtpotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>								
	17	16	10	16	15	13	13	16

Die Pflanzenauswahl wird dabei in die Teilaspekte Artenauswahl, Biomasse, "Wuchsformen", "Lebensformen", und Funktionalität, eingeteilt. Die Reduktion der Vulnerabilität durch eine biologische Vernetzung der Pflanzengesellschaften wird nach horizontaler, vertikaler und regionaler Vernetzung beurteilt. Mit den einzelnen Teilaspekten sind die folgenden Merkmale adressiert.

#### Pflanzenauswahl

Wie bei der Gestaltung aller Begrünungsformen, sollte bei der Auswahl der Arten auf Zuchtarten, gebietsfremde Arten, potentiell invasive, invasive und Neophyten verzichtet werden (Nehring/Skowronek 2017; Wittenberg et al. 2006). Es wird empfohlen, regionale gebietsheimische autochthone Wildarten und naturreaumgetreues oder lokales Pflanzenmaterial zu verwenden, sowie das Regiosaatgut- und Regiopflanzgutkonzept einzubeziehen (siehe Kapitel 8.3 und 8.4). Des Weiteren müssen standortbedingt ökologische Faktoren berücksichtigt werden, wie beispielsweise die Standortgerechtigkeit, der Blühzeitraum, die Blütenfarbe, die Wuchshöhe und die Bestäubungsökologie. Bei bodengebundenem Fassadenbewuchs sollte aufgrund der zunehmenden Trockenheit auf die Ausbildung von Pfahlwurzeln oder Tiefwurzeln wie beispielsweise bei Reb- oder Rosenarten, geachtet werden. Unter den Kletterpflanzen empfiehlt sich beispielsweise Efeu (*Hedera helix*), Wilder Wein (*Parthenocissus quinquefolia*) und Hopfen (*Humulus lupulus*) aufgrund der hohen Biodiversitätsaspekte und den höchsten Feinstaubabscheidewerten (s. Kapitel 8.8). Efeu ist immergrün und bietet damit auch im Winter Nist- und Überwinterungsmöglichkeiten. Im Vergleich verträgt der Wilde Wein eine höhere Sonnenexposition, wodurch sich die beiden Gewächse bestens ergänzen. Hopfen ist das Mittel der Wahl, wenn die Fassade nicht für Selbstklimmer geeignet ist (wächst an vertikalen Stangen oder Seilen). Um mehr Auswahl für die Gestaltung zu erlangen ist es wichtig, weitere heimische Fassadenbegrünungspflanzen zu testen.

#### Biomasse

Der Aspekt der Biomasse ist direkt mit der Erschließung der Klima- und Umweltpotentiale an Fassaden verknüpft. Je höher die Biomasse pro m<sup>2</sup> Fassade und je lückenloser und dichter diese gestaltet ist, desto höher sind die entsprechenden Potentiale der Beschattung, Kühlung, Verdunstungskälte, Dämmung, Feinstaubabscheidung, Materialschutz, Strukturvielfalt sowie der ökologische Mehrwert für Tiere. Allerdings führt eine hohe Biomasse zu zusätzlichen Windlasten durch vergrößerte Windangriffsfläche, was in der Planung berücksichtigt werden muss. Insgesamt werden also die Ökosystemdienstleistungen, die eine fassadengebundene Begrünung eröffnen kann, stark durch die Biomasse geprägt.

#### Wuchsformen

Je nach Fassadenbegrünungen – insbesondere bei wandgebundenen Systemen – können Gräser, Kräuter, Sukkulente, kleine Stauden, hohe Stauden und kleinwüchsige Sträucher als unterschiedliche Wuchsformen kombiniert werden. Kleine flachauslaufende, substratbedeckende Pflanzen dienen dabei als Verdunstungsschutz für das Substrat (Evaporationswiderstand), damit die Wurzeln der anderen Wuchsformen eine längere, häufig substratgebundene, Wasserverfügbarkeit haben.

#### Lebensformen

Außer mit der Verwendung von Moosen in Fassadenbegrünungen wurden mit anderen floristischen Lebensformen wie Bodenbakterien, Bodenpilzen (Mykorrhiza), Mikroalgen und Flechten noch sehr wenige Erfahrungen gesammelt. Wie bei den Dachbegrünungen erläutert, bieten diese Lebensformen der künstlichen Fassadenvegetation zusätzliche Stabilisierung beispielsweise durch Nährstoffeintrag. Moose und Flechten besitzen eine große Oberfläche und werden momentan von verschiedenen kommerziellen Anbietern vor allem als künstliche Wände zur Feinstaubabscheidung getestet (z.B. City Tree der Firma Green City Solution, Berlin). Sie können aber auch in Trockenphasen als oberflächlicher Verdunstungsschutz dienen, da das Substrat durch aufliegende Polster beschattet wird und als Verdunstungsschutz dient (Lakatos 2011).

## Funktionalität

Wie bei der Sensitivitätsanalyse der Dachbegrünung bereits erwähnt, schlägt sich die Funktionalität der Pflanzenauswahl auf zahlreiche ökologische Aspekte und Ökosystemleistungen nieder. Fassadenbegrünungen leisten einen gewissen Beitrag zur Schallreduzierung – allerdings sind die Publikationen dazu nicht neueren Datums und methodisch sehr unterschiedlich. Die Schallreflexion und Lärmreduktion wird von verschiedenen Faktoren wie Frequenz (Hz), Begrünungsaufbau, Substratstärke und Bewuchsdichte beeinflusst. Bei Pflanzen ist die Minderung stark von der Blätterdichte und Lückenlosigkeit, der Blattfläche und Begrünungsdicke sowie von der Blattstellung abhängig. Bezüglich Fassadenbegrünung wurden hierbei Aspekte der Isolation und Lärmreduktion insbesondere bei der Kletterpflanze Efeu (*Hedera helix*) untersucht. Bezüglich der Feinstaubabscheidung wurden auch Wilder Wein (*Parthenocissus quinquefolia*) und Hopfen (*Humulus lupulus*) mitberücksichtigt (s. Kapitel 8.8). Leistungen wie z.B. Verdunstungskälte, Lärmreduktion, Feinstaubabscheidung und Mehrwerte für den gesamten Lebenszyklus von Tieren sollten in weiteren wissenschaftlichen Studien standardisiert ermittelt und zukünftig bei der Gestaltung von Fassadenbegrünungen berücksichtigt werden.

## Vernetzung

Der Vernetzung zwischen Außenanlage und Dachbegrünung durch die Fassadenbegrünung kommt eine ausgesprochen wichtige Funktion zu. Während hier weniger die Ausbreitung von Samen adressiert wird, ist die Erreichbarkeit anderer Biotope für Genaustausch, Ausbreitung und Nahrungssuche der weniger mobilen Tierarten von hoher Bedeutung. Auch die Verfügbarkeit von Rückzugsrefugien unter Extrembedingungen, ihre Funktion als Trittsteinhabitate sowie die weiträumige Vernetzung mit naturnahen Gartenanlagen bis grünen Korridoren (Biotopverbund) ist von höchster Bedeutung. Eine horizontale Vernetzung ist dabei häufig aufgrund der begrenzten Fassadenfläche limitiert. Somit kommt insbesondere der vertikalen Vernetzung bei den verschiedenen Aspekten der Klima- und Umweltpotentiale eine wichtigere Rolle zu. Die regionale Vernetzung stellt insbesondere für die Nahrungssuche aber auch für die Wiederbesiedlung durch neue Tierpopulationen eine grundlegende Voraussetzung dar. Die Entfernung und Vernetzung zur nächsten natürlichen Population sind dabei entscheidende Faktoren.

## **Pflanzenauswahl Fassadenbegrünung**

Zur Auswahl von Pflanzenarten für die Fassadenbegrünung wurde entsprechend der Kriterien, wie sie in 8.5.1 genannt werden, vorgegangen. Aktuelle Empfehlungen und Pflanzenlisten enthalten häufig eine große Anzahl nicht-heimischer Pflanzen sowie Zuchtarten mit ungewissem ökologischem Mehrwert (Pfoser et al. 2013; Dettmar/Pfoser/Sieber 2016; Pfoser 2018; FLL 2018b). Daher wurden in der hier postulierten Pflanzenliste heimische bzw. bereits in der Einbürgerung befindliche Arten verwendet, die gleichzeitig einen hohen ökologischen Mehrwert haben. Weitere Merkmale sind neben der Feinstaubabscheidungskapazität und dem Trockenheitsanspruch, mehr heimische Stauden zu integrieren und für bodengebundene Fassadenbegrünung auch Pflanzen mit tiefer-wurzelnden Pfahlwurzeln und Tiefwurzeln für langandauernde Trockenphasen zu berücksichtigen. Die Umweltpotentiale bzgl. Biodiversität wurden über die Betrachtung des Nutzens im Hinblick auf die Bestäubung durch eine Vielzahl heimischer Insekten (FloraWeb: Schmetterlinge; BiolFlor weitere Insekten) und das Angebot von Früchten als Nahrungsquelle für Wirbeltiere (Vögel, Kleinsäuger) berücksichtigt. Die kurze, explizite Kletterpflanzenliste bildet zusammen mit den angeführten Stauden- und Kleingehölzlisten Potentiale für eine Fassadenbegrünung mit positiven Klima- und Umwelteinwirkungen (s. Tabelle 84, Tabelle 85 und Tabelle 86).

#### 8.5.4. Pflanzenverwendung in Außenanlagen

Die Komplexität, die Außenanlagen bewältigen müssen, nimmt ständig zu. Sie müssen in Wohngebieten, Gewerbegebieten, Freizeitgebieten und Mobilitätsstrukturen sowie dem Verkehr Begrünungen bereitstellen. Der Begrünung in den Städten kommt dabei zunehmend eine neue Aufgabe zu. Waren Außenanlagen zuvor eher ästhetischer und freizeitmotivierender Natur, werden zunehmend Dienstleistungen wie Feinstaubabscheidung, Luftqualitätsverbesserung, Naturschutzaspekte und Klimaaspekte von ihnen verlangt. Gleichzeitig treten abiotische Veränderungen aufgrund des Klimawandels auf und setzen die Außenanlagen zusätzlich unter Stress. Die begrünten Außenanlagen müssen Starkregenereignissen, aber auch lang anhaltende Dürre und hohe Temperaturen widerstehen. Belastungen der Luftqualität durch beispielsweise NO<sub>x</sub> und Feinstaub kann grundsätzlich mit Pflanzen entgegengewirkt werden. Andere Flächen werden immer stärker versiegelt und erschweren die Pflanzenverfügbarkeit des Oberflächenwassers. Gleichzeitig wirken sich dadurch Überhitzung, verminderte Evaporation und erhöhter Oberflächenabfluss negativ auf die Lebensbedingungen der Pflanzen und das Mikroklima in der Stadt aus. Dementsprechend muss die Planung von Außenanlagen sowie der Umbau bestehender Grundflächen neu überdacht und gestaltet werden. Mehr Synergien zwischen Architektur, Raumgestaltung und Umweltschutz müssen gesucht, getestet und umgesetzt werden. Einige Beispiele für diese neue Herausforderung einer Außenanlage werden im Folgenden dargestellt.

Allerdings darf eine „klimaangepasste“ Außenanlage nicht getrennt von Dach- und Fassadenbegrünung gedacht werden, sondern sollte synergetisch z.B. durch funktionelle Teilaufgaben (z.B. Regenwasserretention auf dem Dach, anschließende Bewässerung der Fassadenbegrünung und Regenwasserrückhaltung in Teichanlagen oder Zisternen) oder durch Vernetzung angelegt werden. Wissenschaftliche Erkenntnisse aus Ökologie, Naturschutz, Botanik und Zoologie weisen in zahlreichen Publikationen auf die zentrale Rolle der strukturellen Vernetzung hin. Strukturelle Vernetzung erhöht

- die Mobilität von Mikroorganismen, Tieren und Pflanzen,
- die strukturelle und damit abiotische und biotische Vielfalt und
- die nachhaltige Stabilität und Resilienz von kleinräumigen Ökosystemen.

Damit können vernetzte Strukturen nicht nur gegen Auswirkungen des Klimawandels stabilisiert werden. Auch ihre Ökosystemdienstleistungen, wie z.B. Beschattung, Hitzereduktion, Regenwasserretention, Verdunstungskälte, Feinstaubabscheidung, Luftfiltrierung, Lärmreduzierung und Lebensraum für Mikroorganismen, Pflanzen und Tiere, werten die Bedeutung von Außenanlagen deutlich auf. Eine Integration und Vernetzung dieser funktionellen Grünflächen, wie z.B. Außenanlagen und Gebäudebegrünung in der Stadtplanung eröffnet somit neue Lösungsansätze im Kontext des Klima- und Artenschutzes. Ebenso dient sie als Grundlage für Hitzeaktionspläne sowie als Grundlage für klimaangepasstes Bauen. Durch die enorme Gestaltungsfreiheit und Bodenfläche einer Außenanlage im Vergleich zur Dach- und Fassadenbegrünung kommt deren Gestaltung somit eine der wichtigsten Rollen bezüglich der Verwirklichung von Klima- und Umweltpotentialen zu. Der direkte Einfluss auf das Gebäude ist dabei jedoch nicht immer gegeben, allerdings wirken sich direkte und indirekte Synergien auf eine Liegenschaft aus.

#### Stand der Wissenschaft

Bezüglich grundsätzlicher Fragestellungen und Stand der Technik zu Außenanlagen wird auf Informationen des Bundesbauministeriums wie zum Beispiel dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Außenanlagen von Bundesliegenschaften (BMUB 2016b) oder der BBSR-Broschüre zum nachhaltigen Planen von Außenanlagen (Richter et al. 2019) verwiesen. Zur individuellen Gestaltung der Außenanlage sind in den letzten Jahren des Weiteren zahlreiche populärwissenschaftliche Publikationen erschienen, die die Themen „Klimawandel“ (z.B. Weigelt 2017), „Heimische Gartenpflanzen“ (z.B. Griehl 2017; Schwarzer 2019), „Regenwassernutzung“ (z.B. Polak 2011; Himmelhuber 2013) und vor allem „Lebensräume für

Wildtiere“ (z.B. Günzel 2010; Westphal 2018; David 2018) detailliert thematisieren. Wissenschaftliche Studien adressieren in den letzten Jahren eine Vielzahl von Themen, die hier aufgrund ihrer Breite nicht behandelt werden können. Im Kontext von Klima- und Umweltpotentialen soll jedoch auf einzelne interessante Studien hingewiesen werden. Die Einbindung von Tierschutz in die Gebäudeplanung und Architektur wird momentan beispielsweise im Forschungsprojekt „Animal –Aided-Design“ (AAD) von Prof. Wolfgang Weisser an der TU München und Dr. Hauck an der Universität Kassel erforscht (Weisser/Hauck 2017). Ziel ist es, bereits bei der Städteplanung die Bedürfnisse der angestammten Tierarten über den gesamten Lebenszyklus hinweg artgerecht zu integrieren. Dabei werden konkrete Vorschläge ausgearbeitet, wie Gestaltungselemente, Bäume, Sträucher oder zum Beispiel auch Sandbadeplätze, die Tieren als Rückzugsgebiet und Nahrungsquelle dienen, gestalterisch und artgerecht eingebunden werden können. Auch die zunehmende Trockenheit, urbane Hitzeinseln, Schadstoffexposition und der Gedanke, mehr heimische Pflanzen in der Stadt zu verwenden, werden untersucht. So konnte in dem BLE-geförderten Projekt „Neue einheimische Zierpflanzen und Gehölze durch Nutzung der biologischen Vielfalt: Begrünung von extremen Standorten durch einheimische Pflanzen mit großer Toleranz gegenüber urbanen Stressoren“ unter der Leitung von Prof. Christian Ulrichs an der Humboldt-Universität Berlin eine potentielle Pflanzenliste erstellt werden (Blievernicht/Zander/Ulrichs 2015), die aktuell in einem Modell- und Demonstrationsvorhaben zur Begrünung von Straßenmittelstreifen durch gebietsheimische Pflanzen getestet wird. Die Abscheidung von Feinstaub (s. Kapitel 8.8) wird seit langem auch international adressiert (Reznik/Schmidt 2008; Janhäll 2015; Yang/Chang/Yan 2015; Grote et al. 2016; Abhijith et al. 2017). Mit der Lärmreduzierung speziell durch Hecken setzt sich ein Studie des Fraunhofer Institut für Bauphysik auseinander (Späh et al. 2011). Bei der Gestaltung der Außenanlagen müssen die verschiedenen genannten Aspekte im Kontext des klimaangepassten Bauens eine wichtigere Rolle als bisher spielen.

### Sensitivitätsanalyse Begrünung der Außenanlage

In den vorliegenden Studien werden vornehmlich Synergien zwischen Biodiversität (Blievernicht/Zander/Ulrichs 2015) und Feinstaubabscheidung (Flohr 2011) durch Sträucher und Bäume zusammengestellt. Detaillierte Erläuterung zur Feinstaubbindung und zur Gefährdung durch Feinstaub sowie eine Definition der Begrifflichkeiten finden sich in Kapitel 4.6. Dadurch können insbesondere auch die Biodiversität von Vögeln und Insekten über den gesamten Lebenszyklus hinweg unterstützt werden. Für die Mikroklimasimulation der Musterliegenschaft (s. Kapitel 9.3.1) wurden die im Folgenden gelisteten Pflanzenarten zum Teil verwendet. Zum Beispiel blühen die Gemeine Hasel (*Corylus avellana*; Feinstaubabscheidung  $PM_{10}$ : 1,12 mg/cm<sup>2</sup>;  $PM_{2,5}$ : 0,76 mg/cm<sup>2</sup>) und Weide (*Salix*) als erste Pflanzen im Frühjahr mit einem Angebot für alle Insekten (z.B. Wildbienen, Hummeln, Wollschweber (Bombyliidae)). Alle Obstbäume (blühen danach im Frühjahr und später werden ihre Früchte genutzt) sind für die Artenvielfalt von Insekten und Vögel sehr gut geeignet. Der Laubbaum, der bisher dokumentiert am effizientesten Feinstaub abscheidet, ist *Sorbus intermedia* (Schwedische Mehlbeere) mit  $PM_{10}$ : 2,31 mg/cm<sup>2</sup> und  $PM_{2,5}$ : 1,01 mg/cm<sup>2</sup>. Die Winterlinde (*Tilia cordata*) wird von etwa 25 Schmetterlingsarten besucht und ist wegen ihrer hohen Zuckerkonzentration im Nektar wichtig für Bienen und Hummeln. *Tilia tomentosa* (Silberlinde) mag zum einen aufgrund ihrer Widerstandsfähigkeit (resistent gegen Staub und Rauchgasen von Industrie, Verkehr und Haushalten) und zum anderen wegen ihrer hervorragenden Feinstaubabscheidung aufgrund der faltig-rauen Blattoberseite und des dichten weißfilzigen Haares auf der Unterseite (die PM-Werte für *Tilia tomentosa* betragen  $PM_{10}$ : 1,6 und  $PM_{2,5}$ : 1,21 mg/cm<sup>2</sup>) besser geeignet sein. Sie wird oft entlang von Straßen und in Gärten und Parks gepflanzt und bietet spät im Jahr insbesondere Hummeln eine seltene Nahrungsquelle, da zahlreiche Spätblüher immer seltener werden.



Tabelle 80: Sensitivitätsanalyse der Maßnahme "Außenanlage" zum Aspekt der Strukturvielfalt. Die Beurteilung der Reduktion der Vulnerabilität bezüglich Synergien, die durch Begrünung direkt oder indirekt für das Gebäude entstehen wurde, in fünf Kategorien (stark negativ, negativ, neutral, positiv und stark positiv) eingeteilt (von -2 bis +2)

		Strukturvielfalt							
		Schottergarten	Zierrasen	Kräuterrasen	Blumenwiese	Hecken	Bäume	Einzelmaßnahmen	
<b>Widerstand gegen Klimawandelfolgen:</b>									
	Starkregen	-2	0	1	1	2	2	2	
	Hagel	0	0	1	1	2	2	1	
	Hitze/Trockenheit	-2	-1	1	2	2	2	2	
	Sturm / Böen	-1	1	1	1	2	2	1	
<b>Klimapotentiale:</b>									
	Regenwasserretention	-2	0	1	1	2	2	2	
	Mikroklima	-2	-1	1	2	2	2	2	
<b>Klimapotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>		<b>-9</b>	<b>-1</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	
<b>Umweltpotentiale:</b>									
	Feinstaubbindung	-2	1	1	1	2	2	1	
	Biodiversität (Flora)	-2	0	1	2	2	2	2	
	Biodiversität (Fauna)	-2	0	2	2	2	2	2	
	Naturschutz	-2	0	1	2	2	2	2	
<b>Umweltpotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>		<b>-8</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	
<b>Gesamtpotentiale Vulnerabilitätsreduktion:</b>		<b>-17</b>	<b>0</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>17</b>	

Die Strukturvielfalt wird dabei in die Teilaspekte Schottergarten, Zierrasen, Kräuterrasen, Blumenwiese, Hecken und Bäume eingeteilt. Einzelmaßnahmen adressieren u.a. Regenwasserzisternen und biodiversitätserhöhende Maßnahmen.

#### Schottergärten

Schottergärten haben sich in der letzten Zeit aufgrund der irrigen Annahme verbreitet, dass der Pflegeaufwand geringer sei. Aktuelle Studien konnten allerdings zeigen, dass das nicht der Fall ist, sondern nach wenigen Jahren enormer Zeitaufwand und Reparaturarbeiten von Nöten sind. Die Pflanzung und Wartung von Zwergsträuchern und niedrigen Polsterartigen ist langfristig kostengünstiger. Ansonsten sind Schottergärten eine stadökologische Katastrophe. Sie akkumulieren Hitze, reflektieren in Abhängigkeit der Schotterfarbe und der Korngröße, verringern die Regenversickerung und reduzieren die Evaporationskälte. Pflanzen sollen nicht wachsen und somit stellt dieses Mini-Biotop eine ökologisch tote Wüste dar – ein renommierter Architekt nannte es treffend ein "vorzeitiges Grab".

#### Zierrasen

Der Zierrasen weist immerhin eine nicht-versiegelte Fläche auf, die tiefwurzelnde Gräser beherbergen kann und Tieren ein Minimum an Lebensraum bietet. Die ökologische Wertigkeit kann erhöht werden, wenn man den Rasen selten und vor allem nur 10 - 15 cm hoch mäht, da dann die Fauna größtenteils erhalten bleibt. Wird der Rasen sehr kurz abgeschnitten werden sowohl die Grasnarben verletzt als auch die Fauna massiv gestört. Eine Möglichkeit, einen ästhetisch ansprechenden und ökologisch wertvollen Rasen zu schaffen, ist es, ausgewählte Bereiche nur ein bis maximal zweimal im Jahr zu mähen (Mähhöhe beachten). Diese kleinen Inselbiotop sind Quellen für Pollen und Nektar, schützen den Boden vor starker Einstrahlung durch Verschattung und scheiden pro Fläche wesentlich mehr Feinstaub ab als der kurz gemähte Zierrasen. Die langen Trockenperioden führen regelmäßig zum Absterben von Grasnarben mit kurzen Wurzeln. Diesen Prozess kann man verlangsamen in dem man Moos als Wasserpuffer und Verdunstungswiderstand nicht entfernt. Auch die Beschattung durch Hecken oder Bäume hilft, die Rasen- und Blumenflächen länger vor Dürre zu schützen. Auf das Gießen mit Trinkwasser sollte insbesondere bei Wasserknappheit verzichtet werden. Hierzu empfiehlt es sich das in Regenwasserzisternen aufgefangene Regenwasser zu nutzen, das sowohl vom pH-Wert als auch von den Nährstoffen für Pflanzen günstiger ist.

### Kräuterrasen und Blumenwiese

Als krautige Pflanzen im Garten sind bei Wildbienen und Schmetterlingen beispielsweise folgende Pflanzen beliebt:

- Traubenhyazinthe,
- Krokus,
- Schlüssel- und Glockenblumen,
- Malve,
- Kornblume,
- Distel,
- Wilde Möhre,
- Natternkopf,
- Margerite.

Für eine aus Steinen gebaute Kräuterspirale sinnvoll Lavendel, Salbei, Thymian, Minze und Basilikum. Diese Pflanzen können auch beispielsweise auf dem Balkon direkt eingepflanzt werden. Inzwischen werden fertiges Saatgut oder sogar Mattenbepflanzungen für sogenannte Kräuterrasen angeboten. Höhere Klima- und Umweltpotentiale bieten Wildblumenwiesen. Hierfür werden verschiedene Regiosaatgutmischungen angeboten. Für nährstoffarme steinige Böden empfiehlt es sich, sogenannte Schmetterlingssaaten zu nutzen. Diese bestehen größtenteils aus Hülsenfrüchtlern (Fabaceae oder Leguminosae; früher: Papilionaceae), auch Leguminosen genannt, wie z.B. Klee- und Wickenarten. Durch Symbiose mit stickstofffixierenden Bakterien (Rhizobien) können sie Luftstickstoff als Nährstoff nutzen. Ihre Wurzeln dienen u.a. als Speicherungs- und Überdauerungsorgan und beeinflussen die Bodenstruktur positiv. Insbesondere Tiefwurzeln tragen zum Aufbrechen von Schadverdichtungen im krumennahen Unterboden bei. Die tiefen Wurzeln sorgen jedoch auch für eine nachhaltige Dominanz und starke Konkurrenz gegenüber anderen Pflanzenarten. Wird eine höhere Artenvielfalt bevorzugt, wird häufig auf Saatgut ohne Leguminosen zurückgegriffen. Besonders hohe Klima- und Umweltpotentiale werden erreicht, wenn man verschiedene Wuchsformen mischt (z.B. niedrige und hohe Stauden, Gräser), besonders auf Spätblüher achtet (Blühphase September-Oktober z.B. Korbblüter; u.a. Sonnenhut, Sonnenblume, oder auch der eingebürgerte Neophyt Nachtkerze (*Oenothera biennis*)) und gefährdete Wildpflanzen gezielt in die Blumenwiese ausbringt (z.B. Sand-Strohblume (*Helichrysum arenarium* subsp. *Arenarium*), oder Rauhaarige Alant (*Inula hirta*); s. Tabelle 85).

### Hecken

Sträucher, die hervorragend Feinstaub abscheiden und auch wertvoll für blütenbesuchende Insekten sind, sind beispielsweise der Runzelblättrige Schneeball (*Viburnum rhytidophyllum*; mit Höchstwerten in der Abscheidung  $PM_{10}$ : 9,76 mg/cm<sup>2</sup> und  $PM_{2,5}$ : 7,85 mg/cm<sup>2</sup>) und Blutjohannisbeere (*Ribes sabguineum*;  $PM_{10}$ : 3,57 mg/cm<sup>2</sup> bzw.  $PM_{2,5}$ : 3,18 mg/cm<sup>2</sup>). Beerensträucher werden ebenfalls als wertvoll für Insekten aufgeführt. Sommerflieder (*Buddleja davidii*;  $PM_{10}$ : 1,41 mg/cm<sup>2</sup> bzw.  $PM_{2,5}$ : 1,12 mg/cm<sup>2</sup>) stellt einer der klassischen Schmetterlingssträucher dar. Er wird von über 45 Schmetterlingsarten besucht, steht allerdings unter Beobachtung als potentiell invasive Art. Die Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*) hat zwar nur einen mittleren Abscheidewert ( $PM_{10}$ : 0,46 mg/cm<sup>2</sup> bzw.  $PM_{2,5}$ : 0,39 mg/cm<sup>2</sup>), aber ist sowohl für Insekten und insbesondere im Herbst und Winter aufgrund ihrer zahlreichen Früchte für Vögel wichtig. Bei Außenanlagen können Schlehen-Weißdorn-Rosengebüsche aufgrund des positiven Potentials auf Biodiversität aber auch als Feinstaubabscheider empfohlen werden. Gartenzäune können auch durch Hecken ersetzt werden (Hainbuche, Holunder, Hasel oder echter Lorbeer besitzen einen ökologischen Mehrwert gegenüber den Koniferen, wie griechischer Wacholder und Eibe). Insbesondere für die straßenzugewandte Grundstücksseite empfiehlt sich dies als Vegetationsfilter. Kirschlorbeer sollte dafür nicht verwendet werden, da diese Art in Verdacht steht potentiell invasiv zu sein.

## Bäume

Bei den Bäumen sollte aufgrund der Anfälligkeit gegenüber Sturmereignissen darauf geachtet werden, keine Arten mit hoher Bruchanfälligkeit (z.B. Birke) oder potentiell invasive Arten (z.B. Essigbaum) zu pflanzen. Bäume mit Pfahlwurzeln sind auch hier zu bevorzugen, insbesondere weil sie durch den sogenannten "Hydraulic lift" tiefer gelegenes Wasser nicht nur selbst verbrauchen, sondern auch an die trockene oberflächennahe Bodenschicht und benachbarte Pflanzen abgeben können (Dawson 1993). Besonders tiefe Pfahlwurzeln und hohe Trockenresistenz hat die gebietsfremde mediterrane Pinie (*Pinus pinea*) die mit 164 g/(Baum und Jahr) auch gute Feinstaubabscheidekapazitäten aufweist (Paoletti et al. 2011), was ungefähr dem Wert der gemeinen Fichte entspricht (*Picea abies*; 224 g/(Baum und Jahr) (Grote et al. 2016). Diese ist allerdings nicht so trockenresistent, wie bisher angenommen wurde. Sehr hohe Feinstaubabscheidungen und für das urbanen Umfeld resistent ist die unbeständige Neophyten Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*), die Feinstaubfilterleistungen zwischen 182 g/(Baum und Jahr) (Paoletti et al. 2011) und 320 g/(Baum und Jahr) (Grote et al. 2016) erbringt. Auch auf die ökologischen und staubabscheidenden Leistungen der in der Pflanzenliste (s. Kapitel 8.9.5) erwähnten Bäume sei nochmals hingewiesen. Die Schwedische Mehlbeere (*Sorbus intermedia*), Gemeine Hasel (*Corylus avellana*), Winterlinde (*Tilia cordata*) sowie die Silberlinde (*Tilia tomentosa*) und auch die Rotbuche (*Fagus sylvatica*) weisen mit 549 g/(Baum und Jahr) einen hohen Wert auf (ebd.). Esche (*Fraxinus excelsior*), Ulme (*Ulmus minor*, *Ulmus x hollandica*) und Ahorn (*Acer pseudoplatanus*) hingegen benötigen regelmäßig Wasser und neutrale bis alkalische Böden. Esche hat ein hohes Potential für die Ablagerung von Feinstaub, aber die Wurzeln graben sehr tief (Stichwurzeln). In der Landschaftsarchitektur werden sie daher selten in der Nähe von Straßen oder Gebäuden verwendet. Wenn in der Liegenschaft Photovoltaik- oder Solarthermieanlagen installiert sind, sollte darauf geachtet werden, in Südexposition hohe Sträucher oder niedrige Bäume für die Beschattung der Außenanlage anzupflanzen. Sehr hohe Bäume könnten die Effizienz der zumeist südlich ausgerichteten Photovoltaik- und Solarthermieanlagen durch Schattenwurf verringern.

## Einzelmaßnahmen

Wichtige Einzelmaßnahmen sind die Retention von Regenwasser und biodiversitätsfördernde Maßnahmen. Das Zurückhalten bzw. Zwischenspeichern von Regenwasser im Erdreich, in Mulden, in Behältern, oder in Regenwasserzisternen weist mehrere Klima- und Umweltpotentiale auf. Auf diese Systeme wurde bereits in Kapitel 7.4.5 eingegangen. Das Regenwasser bietet in Trockenphasen Verdunstungskälte (Reduktion von Wärmeinseleffekten), angenehme Luftfeuchtigkeit und Trinkwasser für Tiere. Bei versickerungsoffenen Flächen profitieren auch benachbarte Pflanzen von der hohen Bodenfeuchtigkeit. Gartenflächen, aber auch Flachdächer, lassen sich so ausgestalten, dass Regenwasser verzögert abfließt oder teilweise in das Erdreich versickern kann. Zu den Strukturelementen, die Lebensraumangebote fördern, zählen u.a. Sandlinsen, Asthaufen, Wurzelstöcke, Kiesbereiche (mit unterschiedlich großen Steinen) und Steinblöcke. Letztere können sogar als Kräuterspirale oder Trockenmauer verwendet werden. Aber auch künstliche Behausungen, die Ersatzlebensräume für Fledermäuse, Vögel, Igel, Eidechsen und Insekten (Insektenhotel) anbieten, sind wichtige Bausteine in der klimaangepassten Gartengestaltung.

## **Pflanzenauswahl Begrünung der Außenanlagen**

Zahlreiche Veröffentlichungen zur Gestaltung von Außenanlagen und Pflanzenauswahl stehen zur Verfügung (siehe Stand der Wissenschaft des Kapitels 8.5.4). Im Kontext der zunehmenden Trockenheit und dem Anspruch heimische Pflanzenarten zu nutzen, die evtl. auch in der Stadt höhere Schadstoffbelastungen überstehen, sind jedoch nur selten krautige bis verholzte Pflanzen postuliert bzw. getestet worden (Blievernicht/Zander/Ulrichs 2015). Eine Ausnahme besteht bei Bäumen. Die Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz (GALK) veröffentlichte die Erfahrungen aus zwei Straßenbaumtests aus dem Jahr 1995 und dem zweiten im Jahr 2005 begonnen Test hinsichtlich ihrer Verwendung im Straßenraum und im Kontext des Klimawandels (GALK 2019). Die Eignung verschiedener heimischen Pflanzenarten können den Listen in der Veröffentlichung entnommen werden.

Allerdings kennzeichnen die GALK-Listen nicht, ob es sich um einheimische Bäume handelt, sie verwenden auch überwiegend Zuchtarten. Dabei werden die Frucht-, Nektar- und Pollenproduktion nicht quantifiziert (außer bspw. einem Hinweis „Honigtauabsonderung“) und auch invasive Arten wie z.B. der Götterbaum aufgelistet. Zur Auswahl von Pflanzenarten für die Gestaltung von Außenanlagen in KLIBAU wurde entsprechend der Kriterien, wie sie in Kapitel 8.5.1 genannt werden, vorgegangen. Ein weiteres Kriterium waren Wachstumseigenschaften wie tiefwurzelnende Stauden und Sträucher sowie Bäume mit tieferwurzelnenden Pfahlwurzeln zu integrieren. Durch einen möglichen Zugang zu oberflächennahem Grundwasser wird so eine längere Wasserverfügbarkeit für langandauernde Trockenphasen gewährleistet. Auch die Eignung für Flächen-/ Heckenpflanzungen, Hang- und Böschungsbegrünung oder die Einsatzmöglichkeit als Bodenbedecker wurden berücksichtigt. Die Standortansprüche (Boden, Temperatur, Wasser, Nährstoffe) wurden mittels der Ellenberg Zeigerwerte eingegrenzt (vgl. Ellenberg/Dierschke 2010). Die Einbeziehung der Zeigerwerte dient als Anhaltspunkt für die Standortansprüche der einzelnen Arten. Diese empirischen Zeigerwerte bedeuten allerdings nur, dass unter natürlicher Konkurrenzsituation eine Art unter gewissen gegebenen Standortfaktoren konkurrenzstärker und damit häufiger in der freien Natur zu finden ist. Über die ökologische Amplitude der Pflanze, die häufig wesentlich breiter ist, wird damit nur ein Hinweis auf die mögliche Spannbreite des entsprechenden Umweltfaktors gegeben, in der die Pflanzenart besonders günstig überleben und sich reproduzieren kann. Die Umweltpotentiale bzgl. Biodiversität wurden über die Betrachtung des Nutzens im Hinblick auf die Bestäubung durch eine Vielzahl heimischer Insekten (FloraWeb: Schmetterlinge; BioFlor weitere Insekten) und Angebot von Früchten als Nahrungsquelle für Wirbeltiere (Vögel, Kleinsäuger) einbezogen. Wie auch bei den Dach- und Fassadenbegrünungen ist der vorliegende Vorschlag der Pflanzenauswahl für Stauden, Kleingehölz und Bäume (s. Tabelle 85, Tabelle 86 und Tabelle 87) demnach modifiziert u.a. nach Empfehlungen von

- Deutsche Wildtier Stiftung (2019),
- Westrich (1997) und
- BfN (2019).

## 8.6. Innovativer Naturschutz in den Städten durch Ex-situ Ansiedlung gefährdeter Pflanzengesellschaften

Insbesondere bieten Dachbegrünungen, Grünstreifen und Fassadenbegrünungen strukturelle und abiotische Ähnlichkeiten zu den natürlichen Pflanzengesellschaften der Schutt-, Felsspalten und Mauerfugen-Gesellschaften (Klasse: *Asplenietea trichomanis*) (z.B. Larson et al. 2004; Francis/Lorimer/Raco 2012). Zu den potentiellen Pflanzengesellschaften werden einige Pflanzenassoziationen in der Roten Liste der Pflanzengesellschaft (Rennwald 2000) sowie Biotope der Roten Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands (Finck et al. 2017) als stark gefährdet bis von vollständiger Vernichtung bedrohten Status geführt, mit aktueller abnehmender Entwicklungstendenz und nur bedingter Regenerierbarkeit (etwa 15 Jahre). Diese Pflanzengesellschaften besitzen somit einen hohen Gefährdungsgrad und bedürfen einen dringenden Schutz, der je nach Region auf Begrünungsflächen implementiert werden und zum Erhalt der Biodiversität von Flora und Fauna beitragen könnte. Grundsätzlich sind begrünte Dächer und Fassadenbegrünungen kein adäquater Ersatz für Trockenrasen, Magerwiesen, Ruderalflächen oder andere wertvolle Lebensräume. Trotzdem können sie bei intelligentem Management gefährdete Pflanzengesellschaften im sogenannten ex-situ-Verfahren schützen und damit Trittsteinbiotope für eine Ausbreitung schaffen. Gleichzeitig werden urbane Baumaßnahmen an den Klimawandel und seine Folgen resilient angepasst. Auch beispielsweise die Berliner Strategie zur Biologischen Vielfalt (Kowarik/Bartz/Cloos 2012) strebt in ihrem Ziel 1 (Artenvielfalt und Verantwortung für besondere Arten) an, die hohe Anzahl von Tier- und Pflanzenarten auf Berliner Gebiet zu erhalten und dabei insbesondere die Bestände seltener und gefährdeter sowie anderer naturschutzfachlich bedeutsamer Arten zu sichern. Für ausgewählte Arten soll zudem eine Verbesserung der Bestandssituation herbeigeführt werden.

Bezüglich Dach und Fassadenbegrünungen sind adäquate Gesellschaften die Pflanzengesellschaften der Schutt-, Felsspalten und Mauerfugen-Gesellschaften (Klasse: *Asplenieta trichomanis*) sowie Ruderalgesellschaften. Sie sind wie folgt charakterisiert:

#### **Fels-, Schutt- und Mauergesellschaften:**

Diese Gesellschaft umfasst die Vegetation von Felswänden und Mauern, von überrieselten Felsen und Tuffgestein, von Schutthängen, Moränen, alluvialen Schotterfluren und von Felsplatten, sowie von Pionierfluren auf Sandflächen. Von ihrem Aussehen her ist die Einheit geprägt durch das mineralische Rohsubstrat. Die sehr lückige Vegetation enthält fast stets auch Moose, Farne und Krautpflanzen mit angepassten Wuchsformen, z.B. Sukkulenz und Polsterwuchs (krautige Chamaephyten).

##### 1. *Asplenieta trichomanis*

Fels- und Mauergesellschaften: Felsspalten- und Mauerfugen-Gesellschaften, charakterisiert durch *Asplenium ruta-muraria*, *A. trichomanes*, *Hieracium amplexicaule* und *Sedum dasyphyllum*

##### 2. *Adianteteta*

Tuffwand-Gesellschaften: Sickerfeuchte Kalkfels- und Tuff-Gestein der tieferen Lagen. Diese Gesellschaft kann nicht auf Dach- oder Fassadenbegrünungen abgebildet werden.

##### 3. *Thlaspieteta rotundifolia*

Schutt-, Moränen- und Geröll-Gesellschaften: Gesteine bewegter Schutthalden, Geröll-Alluvionen und Moränen, charakterisiert durch *Arabis alpina*, *Campanula cochleariifolia*, *Geranium robertianum*, *Pritzelago alpina*, *Rumex scutatus*, *Saxifraga exarata* ssp. *moschata*, *Silene vulgaris* ssp. *glareosa*.

##### 4. *Sedo-Sclerantheteta*

Felsgrus-Gesellschaften: Gesteine auf Felsaufstößen, bestehend aus Sukkulente und Einjährigen, charakterisiert durch die konstante Präsenz von *Sedum album*

##### 5. *Tuberarieteta guttata*

Annuelle, kalkarme Sandrasen: Pioniergesellschaften mit säurezeigenden Einjährigen, auf mageren, sandigen Rohböden, in der kollinen Stufe subatlantischer Klimaregionen, charakterisiert durch *Hypochaeris glabra*, *Rumex bucephalophorus*, *Tuberaria guttata*

#### **Ruderalgesellschaften:**

Diese Einheit umfasst die mehrjährigen Ruderalfluren, nährstoffarme und -reiche Pionierfluren an Ufern und die Vegetation der Trittfluren. Sie fasst damit die Lebensräume zusammen, welche starken anthropogenen Störungen abseits von Kultivierungen unterliegen. Die Arten dieser Einheit haben meist kurze (zweijährige) bis sehr kurze (einjährige) Lebenszyklen mit nur einer Blühphase (Therophyten). Ein Vertreter, den man sich auch auf Dach- und Fassadenbegrünungen vorstellen kann, ist:

##### 6. *Plantagineteta majoris*

Sogenannte Trittfluren wie sie in der Stadt üblich sind mit konstanter Präsenz von *Plantago major*

Zusammenfassend trägt eine Ex-situ Ansiedlung gefährdeter Pflanzengesellschaften zum Schutz und Erhalt der Biodiversität von Flora und Fauna bei. Diese künstliche Ansiedlung kann allerdings kein adäquater Ersatz für natürliche Trockenrasen, Magerwiesen oder Ruderalflächen sein. Sie kann aber durchaus als Trittsteinbiotop dienen. Insbesondere für das hier neu dargestellte Konzept der urbanen Ex-situ Renaturierung, aber auch allgemein für urbane Begrünungen werden daher sowohl mehr Forschung als auch mehr unternehmerische Zusammenarbeit der Landschafts- und Stadtplaner mit Ökologen und Architekten gefordert (z.B. Williams/Lundholm/Scott MacIvor 2014; Catalano et al. 2018).

## 8.7. Erhöhungen der Synergien durch eine geeignete Kombination

Sowohl die Kombinationen unterschiedlicher Wuchsformen als auch die Kombination mit unterschiedlichen Lebensformen können zur Stabilität und Effektivität von Begrünungen einen hohen Einfluss haben. Gräser, Kräuter, Sukkulente, kleine Stauden, hohe Stauden, Sträucher und Bäume sind Wuchsformen, die als morphologisch unterschiedliche Pflanzen auch mannigfaltige Merkmalseigenschaften aufweisen. Die verschiedene Zusammenstellung kann sich gegenseitig unterstützende Klima- und Umweltpotentiale besitzen. So konnte in Kanada zum Beispiel gezeigt werden, dass in einer Studie von Dachbegrünungen nicht die Artenzahl, sondern besonders die Zusammenstellung der Wuchsformen signifikanten Einfluss auf deren Ökosystemdienstleistungen wie z.B. Beeinflussung von Oberflächentemperatur, Albedo, Evaporation, Wasserhaltekapazität und Beschattung besitzen (Lundholm/Tran/Gebert 2015; Lundholm et al. 2010). Die Kombination aus Gräsern, Sukkulenten und hohen Stauden haben in diesen Studien die höchsten Leistungen bzgl. Wasserspeicherung, Evaporationskälte und Beschattung erreicht. Die Übertragbarkeit auf europäische Systeme ist grundsätzlich mit Pflanzenarten ähnlicher Morphologie und Ökophysiologie gegeben.

Neben den Samen- oder Blütenpflanzen existieren auch zahlreiche andere floristische Lebensformen wie Bodenbakterien, Bodenpilze (Mycorrhiza), Mikroalgen, Moose und Flechten. Diese Lebensformen bieten der künstlichen Vegetation zusätzliche Stabilisierung beispielsweise durch Nährstoffbereitstellung mittels Mykorrhiza (in Symbiose mit Pflanzenwurzeln und Nährstoffaustausch) (John/Kernaghan/Lundholm 2017), Luftstickstoff fixierende Cyanobakterien (Eintrag von Stickstoffverbindungen während De- und Rehydrierungsphasen) und Knöllchenbakterien (Mitchell et al. 2018) wie den Gattungen *Rhizobium*, *Sinorhizobium*, *Azorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Photrhizobium* und *Frankia* (durch Luftstickstofffixierung und Nährstoffaustausch über die Pflanzenwurzel) (u.a. McGuire et al. 2013; McGuire et al. 2015; John/Kernaghan/Lundholm 2017; Fulthorpe et al. 2018). In natürlichen und experimentellen Systemen wurden insgesamt mikrobielle Wechselwirkungen aufgefunden mit (vgl. Übersichtsartikel: Fulthorpe et al. 2018)

- der Trockentoleranz von Pflanzen,
- dem Schutz vor Pathogenen,
- der Nährstoffverfügbarkeit,
- der Salztoleranz,
- der Phytohormonproduktion und
- der Substratstabilisierung.

Theoretisch müssten Mikrobengemeinschaften auf artifiziellen Begrünungen genauso wie Bodenmikrobengemeinschaften dazu in der Lage sein, Nährstoffe, die durch Feinstaubablagerung eingetragen werden, weiter zu zersetzen und in das Ökosystem zurückzuführen. Untersuchungen dazu scheinen bisher jedoch noch nicht durchgeführt worden zu sein. All dies sind wünschenswerte Eigenschaften von urbanen begrünten Mini-Ökosystemen. Jedoch haben nur wenige Studien die Natur von Mikrobengemeinschaften auf Gründächern untersucht (McGuire et al. 2013; McGuire et al. 2015). Forschungen und Anwendungen in Bezug auf mikrobielle Ökologie und Diversität bieten neue und neuartige Möglichkeiten für die Integration in die grüne Infrastruktur und speziell für die Gestaltung von Gründächern, um das Überleben der Pflanzen und die Bereitstellung von Ökosystemdienstleistungen zu verbessern. Eine weitere Lebensform, die insbesondere langanhaltende Trockenphasen aufgrund ihrer Austrocknungstoleranz überstehen und daher auch keine permanente Wasserverfügbarkeit benötigen, sind Niedere Pflanzen wie Moose und Flechten (Lakatos 2011). Beide Lebensformen sind regelmäßig auf extensiven Dachflächen aufgrund von Selbstverbreitung zu finden (Studlar/Peck 2009). Moose und Flechten besitzen eine große Oberfläche und können ein vielfaches ihres Trockengewichtes an Wasser absorbieren und zurückhalten (Pardow/Hartard/Lakatos 2010; Lakatos 2011).

Mit einem Wassergehalt von 300 % bis 1000 % geben sie das absorbierte Wasser langsam wieder an die Umgebung ab und beeinflussen dadurch kontinuierlich Luftfeuchtigkeit und Evaporationskälte auch auf Dachbegrünungen (Amir et al. 2018). Die Verdunstung von Moos liegt bei 2 bis 20 L/(m<sup>2</sup>d). Offene Wasserflächen verdunsten ca. 10 L/(m<sup>2</sup>d), während krautige Pflanze nur ca. 1,7 L/(m<sup>2</sup>d) durch Evapotranspiration abgeben. Ausgewachsene Bäume evaporieren ungefähr 10 - 30 L/(m<sup>2</sup>d). Moose weisen eine hohe Wasserhaltekapazität vom acht- bis zehnfachen ihres Gewichts auf. Dies entspricht einem Vielfachen verglichen mit nur dem 1,3-fachen für andere typische Gründachpflanzen (Suzaki/Wakui/Iijima 2004; Ondimu/Murase 2006, 2007). Durch die hohe Wasserhaltekapazität besitzen Moose eine um 12 - 14 % höhere Regenwasserretention als Samenpflanzen und Ihre Kühlleistung liegt um das sechsfache höher (Anderson/Lambrinos/Schroll 2010). Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Co-Kultur krautiger Pflanzen mit Moosen oder Flechten keinen negativen Effekt auf das Pflanzenwachstum auf Dachbegrünungen hat (Heim/Lundholm 2014). Im Gegenteil konnte das Zusammenleben mit Moosen und Flechten die Trockentoleranz erhöhen (ebd.) und führte zu bis zu 5 °C - 17 °C kühleren Substrat-Temperaturen (Suzaki/Wakui/Iijima 2004; Heim/Lundholm/Philip 2014) als auch zu höheren Netto-Evapotranspiration der Gründachfläche (Heim/Lundholm/Philip 2014). Bei zu enger Bepflanzung mit Moosen kann aber bei einigen Pflanzenarten die Keimfähigkeit herabgesetzt sein (Drake et al. 2018). Insgesamt erhöht die Einbeziehung der funktionalen Vielfalt, insbesondere der unterschiedlichen Lebensformen, die Vielfalt der Gründächer, was die Resilienz und Leistungsfähigkeit von Gründachsystemen langfristig verbessern kann (Heim/Lundholm 2014).

## 8.8. Feinstaubabscheidung

Der Hauptgrund einer Auseinandersetzung mit Feinstaub besteht in der gesundheitlichen Auswirkung auf den Menschen. Die Symptome reichen von Schleimhautreizungen bis zu einer erhöhten Thromboseneigung. Damit ist Feinstaub in Deutschland statistisch für ca. 44.900 vorzeitige Todesfälle im Jahr verantwortlich (Buxbaum/Nagl/Spangl 2018). Feinstaub ist seit je her natürlich in der Luft vorhanden. So hat der Mensch im Laufe der Evolution Abwehrmechanismen entwickelt. Die Gefährdung für den Menschen ist abhängig von der Zusammensetzung und Menge des Feinstaubes. Feinstaub wurde bereits allgemein in Kapitel 4.6 erläutert. In diesem Kapitel wird nun insbesondere auf die Feinstaubabscheidung durch Pflanzen eingegangen.

Feinstaub wird mit der Luft, die ihn umgibt, transportiert. Im regionalen Kontext spielt der bodennahe Wind die entscheidende Rolle beim Transport von Feinstaub. Er transportiert den Feinstaub ab und verdünnt diesen. Der in einer Stadt lokal anfallende Feinstaub kann großflächig im Umland abgeschieden werden. Bei der Stadt- und Begrünungsplanung ist darauf zu achten, dass der Wind möglichst ungehindert durch alle Straßen wehen kann. Hohe Pflanzen oder andere Objekte können den Windstrom abbremsen oder umlenken (u.a. Reznik/Schmidt 2008). In den entstehenden windstillen Zonen kann sich Feinstaub ansammeln. Falsch gepflanzte Begrünung kann den Wind so stark abschwächen, dass der negative Effekt des reduzierten Feinstaubabtransportes den positiv angestrebten Effekt der Feinstaubabscheidung überwiegt. Durch eine ungeeignete Begrünung kann die Feinstaubkonzentration in der Luft ansteigen (Abhijith et al. 2017).

Feinstaub wird hauptsächlich durch fünf verschiedene Mechanismen aus der Luft entfernt (u.a. Janhäll 2015). Diese sind die Sedimentation, die Impaktion, die Diffusion und die trockene und feuchte Deposition. Da die Partikel eine höhere Dichte als Luft besitzen, setzen diese sich durch die Gravitation der Erde langsam ab. Dieser Vorgang wird als Sedimentation bezeichnet. Durch die geringe Masse jedes einzelnen Teilchens werden die Partikel auf ihrem Weg durch den Luftwiderstand stark abgebremst. Die Geschwindigkeit nimmt mit dem aerodynamischen Querschnitt im Quadrat ab. Dadurch wirkt sich dieser Effekt auf große Teilchen deutlich stärker aus als auf kleine Teilchen. Während Sedimentation bei PM<sub>10</sub> den stärksten Abscheidemechanismus darstellt, spielt er bei PM<sub>0,1</sub> nahezu keine Rolle.

Während die Sedimentation bei geringem Wind dominiert, benötigt die Impaktion den Wind. Ab einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s kommt dieser Effekt zur Geltung. Trifft Wind auf ein Hindernis, bilden sich Turbulenzen. Zu den bei der Sedimentation vorherrschenden Kräften kommt nun die Fliehkraft hinzu. Die Partikel können sich damit schneller relativ zur Luft bewegen und Oberflächen erreichen. Sie werden bei der Umströmung eines Objektes sozusagen aus der Kurve geschleudert. Eine raue, gekrümmte oder behaarte Oberfläche begünstigt somit die Impaktion (Reznik/Schmidt 2008; Weerakkody et al. 2018). Die Diffusion stellt die wohl einfachste Form der Feinstaubabscheidung dar. Während die Partikel mit der Luft transportiert werden, streifen sie dabei entlang von Oberflächen. Durch elektrostatische und chemische Kräfte werden sie von der Oberfläche angezogen und festgehalten. Dieser Effekt wird durch das Anlegen hoher elektrischer Spannungen verstärkt und zur Feinstaubfilterung genutzt. Nasse Deposition bezeichnet das Auswaschen der Partikel und den Weg zur Akzeptoroberfläche durch Regen, Schnee und Hagel. Geschieht dieser Austrag durch feste Partikel oder Nebel ist die Rede von trockener Deposition. Besonders die nasse Deposition ist der maßgebliche Mechanismus, um kleine Partikel abzuscheiden, deren Sedimentation und Impaktion sehr lange dauert. Niederschlag ist somit der ausschlaggebende Faktor für die Abscheidung von PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>0,1</sub>.

Pflanzen können die Abscheidung von Feinstaub fördern. Die Vegetationsdichte der Pflanzen beeinflusst beispielsweise sowohl die Deposition als auch die Dispersion (Ausbreitung) von Feinstaub (Grote et al. 2016). Zur Abschätzung der Deposition wird die Vegetationsfläche entweder beurteilt als Blattflächenindex (LAI, leaf area index: Blattfläche/Grundfläche, dimensionslos) oder als Blattflächendichte (LAD, leaf area density: Blattfläche /Volumeneinheit (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)). Für die Dispersion wird die Porosität als Zugkraft oder Druckabfall gemessen. In der Literatur werden dazu viele unterschiedliche Messmethoden verwendet, die die Vergleichbarkeit erschweren. Die dabei üblicherweise verwendete Abschätzung bzw. Umrechnung von Deposition in Dispersion und anders herum, führt zu einer großen Unsicherheit in den Ergebnisse (Janhäll 2015). Die Porosität ändert sich bei hohen Windgeschwindigkeiten mit abnehmender Porosität für Laubbäume und erhöhter für Nadelbäume (Tiwary/Morvan/Colls 2006). Die Zugkraft bzw. Widerstandskräfte auf Bäume nehmen mit zunehmender Windgeschwindigkeit ab (Gromke/Ruck 2008). Bei 10 m/s erniedrigen sich sowohl die Abscheideeffizienz, und in noch größerem Maße, die Depositionsgeschwindigkeit bei Laubbäumen im Vergleich zu geringen Windgeschwindigkeiten (Beckett/Freer-Smith/Taylor 2000). Hecken verschiedener Arten zeigen Feinstaubabscheideeffekte nur oberhalb einer bestimmten Schwelle, z.B. 0,8, 1,2 und 1,7 m/s für Weißdorn, Stechpalme bzw. Eibe (Tiwary/Morvan/Colls 2006).

Die Ergebnisse der meisten Experimente und Freilanduntersuchungen zeigen signifikante Unterschiede in der PM-Akkumulation zwischen Nadeln und Laubblättern (Reznik/Schmidt 2008; Janhäll 2015; Yang/Chang/Yan 2015; Grote et al. 2016) sowie verschiedenen Blattgrößen, Blattformen (z.B. elliptisch, handlappig und linear) und Blattmikromorphologien (Blatthaar / Trichome, epikutikuläres Wachs sowie Oberflächenrauigkeit und -rippen). Dies deutet darauf hin, dass alle diese Merkmale einen Einfluss auf die Abscheidung und Retention von Feinstaub auf Blättern haben (Sæbø et al. 2012; Weber/Kowarik/Säumel 2014; Weerakkody et al. 2018). Kleinere Blätter und komplexe Blattformen (ge-lappte Blätter) zeigten ein größeres Potential, Feinstaub abzuscheiden und zurückzuhalten. Blattoberflächen mit Haaren / Trichomen, epikutikulärem Wachs und Oberflächenrippen sammelten mehr Feinstaub als glatte Oberflächen. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Haarigkeit der Blätter bzw. das Vorhandensein von Trichomen den stärksten Einfluss haben. Arten, die die meisten dieser wichtigen Blattmerkmale teilen, werden als wirksame Feinstaubfilter empfohlen (z.B. *Sisymbrium loeselii*; *Polygonum aviculare*, *Convolvulus arvensis*, *Chenopodium album*, *Achillea millefolium*, *Berteroa incana*, *Galinsoga parviflora* (Weber/Kowarik/Säumel 2014)), wobei auch die Höhe der Pflanze eine Rolle spielt. Beispielsweise weisen Blätter entlang eines Straßenrandes, die über der mittleren Probennahmehöhe von 15 cm geerntet wurden, signifikant größere Mengen an Feinstaub auf, als Blätter unterhalb dieser Wuchshöhe (ebd.).



Da die Menge der abgelagerten Masse direkt mit der oberflächennahen Luftkonzentration zusammenhängt, konnte auch festgestellt werden, dass in Abhängigkeit der Entfernung zur Straße die Luftkonzentration um verschiedene krautige Pflanzen herum mit der dortigen Massendeposition von Feinstaub übereinstimmt (Weber/Kowarik/Säumel 2014). Die Autoren fanden heraus, dass für 3 - 180 µm große Partikel insbesondere haarige Blätter die Ablagerung wesentlich erhöhten. Auf einer extensiven Dachbegrünung analysierten Speak et al. (2012) die Ablagerungen auf verschiedenen Vegetationsarten und fanden größere Ablagerungen auf Gräsern (*Agrostis stolonifera* und *Festuca rubra*) im Vergleich zu anderen krautigen Pflanzen (z.B. *Sedum album* und *Plantago lanceolata*). Die Fähigkeit unterschiedlicher Blätter, PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> aufzunehmen, wurde ebenfalls mit 79 Pflanzenarten genauer untersucht (Flohr 2011). Dabei wurden die Blätter mit künstlichen Stäuben, deren Korngröße dem Feinstaubpartitionen PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> entsprechen, besprüht und anhand der Gewichtszunahme die Staubaufnahme bestimmt. Das Spektrum der Abscheidefähigkeiten reichte von 0,05 mg/cm<sup>2</sup> (*Clematis vitalba*) bis 9,76 mg/cm<sup>2</sup> (*Viburnum rhytidophyllum*).

Das weite Spektrum wird dabei hauptsächlich durch die Geometrie und Härchen der Blätter bestimmt. Diese wurden in drei Behaarungsstärken eingeteilt. Die Kategorie „keine nennenswerte Behaarung“ konnte im Schnitt 0,33 mg/cm<sup>2</sup> aufnehmen, die „lockere Behaarung“ im Schnitt 0,56 mg/cm<sup>2</sup> und die „dichte Behaarung“ 1,29 mg/cm<sup>2</sup>. Erwartungsgemäß weist die Pflanze mit dem höchsten Feinstaubabscheidungspotential (*Viburnum rhytidophyllum*) ein stark verschlungenes und behaartes Blatt auf. Diese Eigenschaft ist auch für den umgangssprachlichen Namen Runzelblättriger Schneeball verantwortlich (Flohr 2011). Bezüglich Fassadenbegrünung wurden unter den Kletterpflanzen für Efeu (*Hedera helix*), Wilden Wein (*Parthenocissus quinquefolia*) und Hopfen (*Humulus lupulus*) die höchsten Werte ermittelt. Efeu ist immergrün und kann auch im Winter, wenn die Belastung am höchsten ist, Feinstaub aufnehmen. Efeu ist jedoch nicht resistent gegenüber zu viel Sonne. Der Wilde Wein benötigt hingegen besonders viel Sonne, wodurch sich die beiden Gewächse bestens ergänzen. Ist die Fassade nicht für Selbstklimmer geeignet, ist Hopfen die nächste Wahl. Dieser wächst an vertikalen Stangen oder Seilen, die vor die Fassade montiert werden. Um mehr Auswahl für die Gestaltung zu erlangen ist es wichtig, weitere Kletterpflanzen zu untersuchen.

Tabelle 81: Feinstaubaufnahme PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> in mg/cm<sup>2</sup> (sd: Standardabweichung) sortiert nach Wuchsformen und Pflanzenarten (modifiziert nach Flohr (2011); beinhaltet sowohl heimische als auch gebietsfremde Arten)

Kategorie	Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	Stabw (PM <sub>10</sub> )	Stabw (PM <sub>2,5</sub> )	
<b>Selbstklimmer</b>	<i>Hedera helix</i>	Gemeiner Efeu	0,35	0,26	0,04	0,04	
	<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	Selbstkletternde Jungfernrebe	0,26	0,26	0,04	0,01	
	<i>Parthenocissus triepidata</i>	Dreispietige Jungfernrebe	0,13	0,12	0,05	0,03	
<b>Schlinger/ Winder</b>	<i>Humulus lupulus</i>	Echter Hopfen	0,28	0,27	0,13	0,09	
	<i>Bryonia dioica</i>	Rotfrüchtige Zaunrübe	0,22	0,22	0,07	0,08	
	<i>Calystegia sepium</i>	Echte Zaunwinde	0,22	0,21	0,05	0,04	
<b>Ranker</b>	<i>Clematis vitalba</i>	Gewöhnliche Waldrebe	0,05	0,05	0,01	0,01	
<b>Stauden</b>	<i>Phlomis fruticosa</i>	Strauchiges Bandkraut	2,13	1,37	0,68	0,38	
	<i>Althaea officinalis</i>	Echter Eibisch	1,93	1,76	0,64	0,43	
	<i>Salvia officinalis</i>	Echte Salbei	1,31	0,72	0,17	0,11	
	<i>Weigelia middendorffiana</i>	Gelblütige Weigelie	1,29	1,12	0,12	0,14	
	<i>Potentilla anserina</i>	Gänsefingerkraut	1,20	0,12	0,26	0,03	
	<i>Geranium x magnificum</i>	Cambridge Storchschnabel	1,15	1,10	0,32	0,23	
	<i>Hieracium pilosella</i>	Kleines Habichtskraut	0,99	0,11	0,09	0,02	
	<i>Alchemilla mollis</i>	Weicher Frauenmantel	0,94	0,72	0,27	0,17	
	<i>Nephrolepis exaltata</i>	Schwertfarn	0,57	0,39	0,06	0,05	
	<i>Plantago major</i>	Breitwegerich	0,57	0,14	0,08	0,03	
	<i>Lamium album</i>	Weißes Taubnessel	0,55	0,04	0,09	0,01	
	<i>Lavandula angustifolia</i>	Echter Lavendel	0,49	0,28	0,11	0,09	
	<i>Solidago gigantea</i>	Riesen Gldrute	0,43	0,39	0,12	0,12	
	<i>Galium aparine</i>	Klettenlabkraut	0,42	0,12	0,10	0,04	
	<i>Pelargonium peltatum</i>	Hängegeranien	0,41	0,31	0,08	0,07	
	<i>Calathea rufibarba</i>	Korbmarate	0,40	0,23	0,03	0,03	
	<i>Petunia x hybrida</i>	Petunien	0,37	0,34	0,09	0,08	
	<i>Urtica dioica</i>	Große Brennnessel	0,35	0,11	0,03	0,03	
	<i>Artemisia vulgaris</i>	Beifuß	0,33	0,08	0,04	0,02	
	<i>Filipendula ulmaria</i>	Echtes Mädesüß	0,33	0,03	0,08	0,02	
	<i>Ajania pacifica</i>	Silber-Chrysantheme	0,30	0,22	0,07	0,03	
	<i>Convolvulus arvensis</i>	Ackerwinde	0,26	0,17	0,05	0,03	
	<i>Tanacetum vulgare</i>	Fainfarn	0,18	0,21	0,03	0,04	
	<i>Taraxacum officinalis</i>	Gewöhnlicher Löwenzahn	0,09	0,03	0,02	0,01	
	<b>Kleingehölz</b>	<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	Runzelblättriger Schneeball	9,76	7,85	2,57	2,12
		<i>Ribes sanguineum</i>	Blutjohannisbeere	3,57	3,18	0,47	0,62
<i>Buddleja davidii</i>		Sommerflieder	1,41	1,12	0,36	0,29	
<i>Corylus avellana</i>		Gemeine Hasel	1,12	0,76	0,27	0,15	
<i>Viburnum lantana</i>		Wolliger Schneeball	1,00	0,41	0,27	0,13	
<i>Ficus benjamini</i>		Birkenfeige	0,58	0,33	0,03	0,03	
<i>Fallopia japonica</i>		Japanischer Staudenknoterich	0,52	0,46	0,11	0,07	
<i>Dracaena marginata</i>		Drachenbaum	0,48	0,22	0,05	0,04	
<i>Sorbus aucuparia</i>		Vogelbeere	0,46	0,39	0,05	0,03	
<i>Dracaena fragans</i>		Drachenbaum	0,45	0,16	0,02	0,02	
<i>Prunus laurocerasus</i>		Lorbeer-Kirsche	0,42	0,38	0,06	0,04	
<i>Rhododendron catawbiense</i>		Rhododendron	0,37	0,30	0,08	0,08	
<i>Beberis vulgaris</i>		Gewöhnliche Berberitze	0,35	0,04	0,06	0,02	
<i>Chamaedorea elegans</i>		Bergpalme	0,30	0,25	0,02	0,02	
<i>Sambucus nigra</i>		Schwarzer Holunder	0,28	0,25	0,06	0,07	
<i>Philadelphus coronarius</i>		Europäischer Pfeifenstrauch	0,15	0,12	0,03	0,02	
<i>Prunus spinosa</i>		Schlehndorn	0,15	0,03	0,03	0,01	
<i>Euonymus europaeus</i>		Gewöhnlicher Spindelstrauch	0,09	0,10	0,02	0,02	

Tabelle 82: Fortführung der Tabelle 81: Feinstaubaufnahme PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> in mg/cm<sup>2</sup>

<b>Bäume</b>	<i>Sorbus intermedia</i>	Schwedische Mehlbeere	<b>2,31</b>	<b>1,01</b>	0,41	0,21
	<i>Corylus colurna</i>	Baumhasel	<b>1,86</b>	<b>0,67</b>	0,17	0,07
	<i>Tilia tomentosa</i>	Silber-Linde	<b>1,60</b>	<b>1,21</b>	0,20	0,13
	<i>Quercus rubra</i>	Roteiche	<b>1,33</b>	<b>0,83</b>	0,18	0,14
	<i>Rhus typhina</i>	Essigbaum	<b>0,61</b>	<b>0,57</b>	0,19	0,11
	<i>Fagus sylvatica</i>	Rotbuche	<b>0,41</b>	<b>0,17</b>	0,05	0,02
	<i>Carpinus betulus</i>	Hainbuche	<b>0,27</b>	<b>0,26</b>	0,01	0,04
	<i>Pyrus pyraster</i>	Wildbirne	<b>0,26</b>	<b>0,05</b>	0,04	0,01
	<i>Fraxinus excelsior</i>	Gemeine Esche	<b>0,25</b>	<b>0,22</b>	0,04	0,06
	<i>Aesculus hippocastanum</i>	Gewöhnliche Rosskastanie	<b>0,24</b>	<b>0,23</b>	0,09	0,08
	<i>Acer pseudoplatanus</i>	Bergahorn	<b>0,19</b>	<b>0,19</b>	0,07	0,04
	<i>Quercus robur</i>	Stieleiche	<b>0,19</b>	<b>0,17</b>	0,07	0,04
	<i>Platanus x hispanica</i>	Ahornblättrige Platane	<b>0,13</b>	<b>0,10</b>	0,03	0,02
	<i>Juglans regia</i>	Echte Walnuss	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	0,03	0,03
	<i>Robinia pseudoacacia</i>	Gewöhnliche Robinie	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	0,02	0,01
	<i>Betula pendula</i>	Hängende Birke	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	0,01	0,01
	<b>Gräser</b>	<i>Lagurus ovatus</i>	Samtgras	<b>3,91</b>	<b>1,50</b>	0,53
<i>Festuca cinerea</i>		Blauschwingel	<b>1,85</b>	<b>0,29</b>	0,30	0,06
<i>Holcus lanatus</i>		Wolliges Honiggras	<b>1,49</b>	<b>1,24</b>	0,21	0,35
<i>Arrhenatherum</i>		Gewöhnlicher Glatthafer	<b>1,37</b>	<b>0,75</b>	0,31	0,18
<i>Hordeum murinum</i>		Mäusegerste	<b>1,34</b>	<b>0,49</b>	0,14	0,11
<i>Bromus erectus</i>		Aufrechte Treppe	<b>0,70</b>	<b>0,49</b>	0,13	0,15
<i>Poa annua</i>		Einjähriges Rispengras	<b>0,57</b>	<b>0,34</b>	0,19	0,14
<i>Phleum pratense</i>		Wiesen Lieschgras	<b>0,53</b>	<b>0,50</b>	0,19	0,22
<i>Deschampsia cespitosa</i>		Rasen Schmiele	<b>0,48</b>	<b>0,07</b>	0,07	0,01
<i>Agrostis stolonifera</i>		Weißes Straußgras	<b>0,46</b>	<b>0,59</b>	0,15	0,17
<i>Lolium multiflorum</i>		Welsches Weidegras	<b>0,35</b>	<b>0,27</b>	0,09	0,08
<i>Setaria glauca</i>		Rote Borstenhirse	<b>0,35</b>	<b>0,23</b>	0,12	0,06
<i>Dactylis glomerata</i>		Gewöhnliches Kneuelgras	<b>0,33</b>	<b>0,27</b>	0,07	0,08
<i>Bromus inermis</i>		Wehrlose Treppe	<b>0,32</b>	<b>0,36</b>	0,06	0,03
<i>Lolium perenne</i>		Deutsches Weidelgras	<b>0,30</b>	<b>0,26</b>	0,06	0,09
<i>Anthoxanthum</i>		Gewöhnliches Ruchgras	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	0,04	0,04
<i>Briza maxima</i>		Großes Zittergras	<b>0,19</b>	<b>0,13</b>	0,04	0,03

Die abgeschiedenen Feinstaubpartikel werden durch Regen von den Blattflächen abgewaschen. Dies trifft insbesondere auf die gröbere Fraktion zu (Przybysz et al. 2014). Hat sich der Feinstaub in dem Wachs der Blattkutikula abgelagert, ist die Entfernung der Partikel durch Wind oder Regen geringer (Dzierzanowski et al. 2011). Messungen an 13 Pflanzenarten haben gezeigt, dass ca. 60 % der Partikelablagerung mit Wasser abgewaschen wurden, während etwa 40 %, mit großen Varianzen zwischen den Arten, an der Wachsschicht gebunden waren (Popek et al. 2013). Drei Jahre alte Nadeln hatten beispielsweise mehr Polyzyklische Aromatische Verbindungen (PAK) in das Nadelwachs überführt. Diese konnten mit Wasser oder im Ultraschall Bad nicht abgewaschen werden und es zeigte sich ein Alterungseffekt auf der Nadeloberfläche (Terzaghi et al. 2013). Nur Partikel kleiner als 10 µm waren in die Blatt-/Nadelkutikula eingekapselt und konnten nicht durch Wasser abgewaschen werden (ebd.). Höhere Pflanzen binden somit im Allgemeinen keinen Feinstaub, sondern scheiden den Feinstaub aus der Luft ab. Durch Regen wird er von der Blattoberfläche abgewaschen.

Zur Feinstaubabscheidung und zur tatsächlichen Feinstaubbindung weisen Moose hohe Potentiale auf. Der ungefähre Blatt-Oberflächenmittelwert von Moosen liegt bei einem Leaf Area Index von 11 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> (Stabw: ±5, N = 15; Median: 9,6; eigene Studien). Die Vegetation von höheren Pflanzen weisen hingegen LAI Bereiche von 5 bis 10 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> auf. Moose besitzen somit eine größere Fläche zur Feinstaubabscheidung. Aufgrund ihrer hohen Kapazität Feinstaub zu akkumulieren, werden sie auch häufig im Biomonitoring eingesetzt. Die Feinstaub- bzw. Metallakkumulation ist signifikant durch artspezifische Unterschiede geprägt (Schröder/Pesch 2010).

Häufig untersuchte Arten sind die Torfmoose der Gattung *Sphagnum*, *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens* und *Hypnum cupressiforme*. Moose akkumulieren Schwermetalle und Feinstaubpartikel überwiegend extrazellulär außerhalb des Zytoplasmas an der Moosoberfläche. Dabei lagern sich entweder Partikel als Schichten ab, Schadstoffe werden von der Oberfläche von Zellen eingeschlossen, in die äußere Zellwand durch Ionenaustauschprozesse inkorporiert oder durch kontrollierte Stoffwechselprozesse in die Zelle geleitet (Bates 1990). Die Adhäsion/Akkumulation wird unter anderem durch die Ionenaustauschkapazität und fehlende bzw. reduzierte Kutikula an der Oberfläche begünstigt. Die tatsächlichen Feinstaubbindungskapazitäten im Vergleich zu höheren Pflanzen müssen allerdings noch untersucht werden.

Werden in einer Stadt großflächig begrünte Fassaden eingesetzt, ist mit einer Reduzierung des Feinstaub-Hintergrundlevels zu rechnen. Direkt neben stark befahrenen Straßen macht der Hintergrundlevel jedoch nur einen Bruchteil der lokalen Feinstaubbelastung aus. In den meisten Fällen sind Straßenschluchten gleich aufgebaut. In der Mitte befindet sich die Straße, außen die Fassaden der begrenzenden Gebäude und dazwischen der schützenswerte Fußweg. Der durch den Verkehr emittierte Feinstaub gelangt demnach erst zum Menschen bevor er an der begrünten Fassade abgefangen werden kann. Ähnliches gilt auch für Einfamilienhäuser, wie der in diesem Forschungsprojekt untersuchten Musterliegenschaft. Die filternde Begrünung müsste demnach eigentlich zwischen Straße und Fußweg positioniert sein, um eine optimale Wirkung zu erzielen. Im Fall des Einfamilienhauses kann eine hohe Gartenhecke zur Straße hin eine Reduzierung hervorrufen. Allerdings könnten beide Arten der Begrünung den Wind ausbremsen und den Abtransport des Feinstaubes verlangsamen. Welcher Effekt überwiegt ist sehr situationsabhängig und muss in jedem Einzelfall analysiert werden. Um die volle Filterwirkung von Pflanzen nutzen zu können, müssen diese richtig umströmt werden. Eine starke Umströmung ist hier von Vorteil, besitzt aber immer auch gleichzeitig den Nachteil den Wind an anderer Stelle abzubremesen. Wind kann als eine Ressource betrachtet werden, die entweder dazu genutzt wird Feinstaub davonzutragen oder Feinstaub besser aufzunehmen. Das Verhältnis dieser zwei Nutzen ist noch fein auszuloten. Weiter untersucht werden sollte auch die Kombination mehrerer Arten. Neben den natürlichen Synergien, die durch Mutualismus (Wechselbeziehung) mehrerer Arten entstehen, könnte es auch positive Effekte zur Feinstaubbindung geben. Durch Entschleunigung des Windes (Reznik/Schmidt 2008), gegenseitige Verschattung und Feuchtespeicherung könnte mehr Feinstaub aufgenommen werden, als es die Summe beider einzelnen Pflanzen könnte. Auch ist es empfehlenswert die Möglichkeit von Vegetationsbarrieren zwischen verschmutzten Gebieten und gefährdeten Gebieten (zum Beispiel Spielplätze, Schulen, Krankenhäuser und Wohngebiete) zu adressieren (Sæbø et al. 2012). Ein entsprechendes Pflanzenscreening muss in einem geeigneten Design etabliert werden und sollte aus den effizientesten Strauch- und Baumarten zur Feinstaubabscheidung bestehen. Das Design könnte sich sowohl darauf ausrichten, Luftströme zu lenken als auch die Luft zu filtern, wodurch gefährdete Bereiche vor den höchsten Feinstaub-Verschmutzungen geschützt werden könnten. Untersuchungen der Effizienz von Arten bei der Abscheidung von Feinstaub und anderen Schadstoffen ist ein notwendiger Schritt vor der Planung und Gestaltung von effizienter, die Umweltverschmutzung mindernder Vegetation. Artenspezifische Informationen sind ebenfalls wichtig für die Fähigkeit und Optimierung von Modellen, um die Vorteile der Vegetation für die Stadt vorherzusagen. Beide Aspekte wurden in den hier postulierten Pflanzenlisten berücksichtigt.

## 8.9. Pflanzenlisten

### 8.9.1. Pflanzenliste für extensive bis semi-intensive Dachbegrünung

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Artname	Floristischer Status	Gefährdung & Schutz	Lichtzahl	Temp	Wuchshöhe (cm)	Behaarung	Blühphase (1-12)	Nahrungsnetz
<i>Agrostis stolonifera</i>	Weißes Straußgras	einheimisch	nicht besonders geschützt	8	indifferent	8-40	Halme sind glatt und kahl	7-8	Futterpflanze: 2x Tagfalter
<i>Alyssum alyssoides</i>	Kelch-Steinkraut	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	9	6	4-25	Stg. Sternhaarig; ; lockere Behaarung durch Sternhaare an Blattunterseite;	4-9	B; WB
<i>Anthemis tinctoria</i>	Färber-Hundskamille	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	6	20-60	kurzhaarig an Blattunterseite; Stg. ist filzig behaart	6-9	WB, B, 4x F; Spinnerartige, Kamillen-Blütenesspanner Gef. 0!!!; Eulenfalter, Tagfalter [Gefährdung 2]
<i>Anthyllis vulneraria</i>	Gewöhnlicher Wundklee	einheimisch	nicht besonders geschützt	8	6	5-40	weißzottig behaarter Kelch	6-9	Hu; 6x F (1x Spinnerartige, 4x Tagfalter [2x Gefährdung: 2]; 1x Eulenfalter[Gefährdung: 3])
<i>Aubrieta deltoidea</i>	Griech. Blaukissen	in Einbürgerung befindlicher Neophyt	nicht besonders geschützt	kA	kA	5-20	St und Bl von Haaren besetzt	4-6	WB (z.B. Blauschwarzen Holzbiene ( <i>Xylocopa violacea</i> ))
<i>Aurinia (Alyssum) saxatilis</i>	Felsensteinkraut-	einheimisch	besonders geschützt	9	7	12-20	Stg. Mit kurz gestielten Sternhaaren; Blätter filzig behaart	4-5	B; WB (z.B. Gewöhnlichen Furchenbiene ( <i>Halictus tumularum</i> ))
<i>Campanula carpatica</i>	Karpaten-Glockenblume	in Einbürgerung befindlicher Neophyt	nicht besonders geschützt	8	6	10-50	polsterbildend, Bl leicht behaart	5-8	WB, Schm, Hu,
<i>Campanula rotundifolia</i>	Rundblättrige Glockenblume	einheimisch	nicht besonders geschützt	7	5	10-60	Stg zumindest im unteren Teil ringsum dicht kurz flaumig;	6-9	WB, 4x Schm (davon 2x Gefährdung 2 & 1x R; 2x Eulenfalter, 2x Spanner; , Hu,
<i>Clinopodium (Calamintha) nepeta subsp. nepeta</i>	Kleinblütige Bergminze	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	7	30-90	Blätter sind wollig behaart	6-9	B, Schm
<i>Dianthus deltoides</i>	Heide-Nelke	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	5	10-40	Stg. Und Blätter kurz haarig	6-9	WB, Falter;
<i>Digitalis purpurea</i>	Roter Fingerhut	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	5	50-120	Blätter unterseits graufilzig	6-8	WB, Hu
<i>Echium vulgare</i>	Gewöhnlicher (Blauer) Natternkopf	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	9	6	25-150	Stg. Kurzhaarig od. mit stehenden stehenden Haaren (Borsten);	5-10	B, WB, Schwebfliegen, Falter (ca. 40 Schmetterlingsarten davon Gefährdung von 1-3)
<i>Festuca rubra</i>	Rot-Schwingel	einheimisch	nicht besonders geschützt	indifferent	indifferent	(15-) 20-100 (-120)	Rippen der Blattoberseite nur rau od. höchstens locker flaumig behaart	4-10	Futterpflanze: Tagfalter (19 davon 7x Gefährdung), 1x Spinnerartige
<i>Gonolimon tataricum</i>	(Strandflieder)	in Einbürgerung befindlicher Neophyt	nicht besonders geschützt	7	7	30-50	zahlreiche rispenförmige Blüten	7-9	kA
<i>Hyssopus officinalis</i>	Ysop	eingebürgerte r Neophyt	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	7	20-60	Stg. Kurzflaumig bis fast samtig	6-10	WB, B, Schm, Hu
<i>Lavandula angustifolia</i>	Echter (Schmallblättriger) Lavendel	in Einbürgerung befindlicher Neophyt	nicht besonders geschützt	8	7	bis 100 (selten bis 200)	Stg. und Blätter sind graufilzig behaart	6-8	B, WB, Hu, Schm
<i>Matricaria caucasica</i>	Teppich-Kamille	in Einbürgerung befindlicher Neophyt	nicht besonders geschützt	8	7	10-15	Blattspreiten sind kahl oder schwach behaart	5-6	kA
<i>Nepeta xfaassenii</i>	Hybrid Katzenminze	in Einbürgerung befindlicher Neophyt	nicht besonders geschützt	8	7	25-50 (selten bis 75)	Rauhe Blattoberfläche	5-9	B, WB, Hu, Schm,
<i>Nepeta cataria</i>	Echte Katzenminze	einheimisch	gefährdet & nicht besonders geschützt	8	7	50-120	Stgängel & Blätter (Ober- und Unterseite) haben kurze dichtfilzige Flaumhaare	5-9	B, WB, Hu, Schm
<i>Pentanema ensifolium</i>	Schwert-Alant	ausgestorbene einheimische Sippe	nicht besonders geschützt	kA	kA	10-50	Blätter am Rand kurz bewimpert, auf den Flächen aber kahl	5-8	B, WB

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Artname	Floristischer Status	Gefährdung & Schutz	Lichtzahl	Temp	Wuchshöhe (cm)	Behaarung	Blühphase (1-12)	Nahrungsnetz
<i>Pulsatilla vulgaris</i>	Gewöhnliche Küchenschelle	einheimisch	gefährdet & besonders geschützt	7	6	5-13 (fruchtend 40 [50])	Hochblattwirtel und Blütenhüllblätter silbrig behaart (Grundstg Blätter doppelt gefiedert)	3-5	B, WB, Hu; Schmetterlinge, Ameisen
<i>Sanguisorba officinalis L.</i>	Großer Wiesenknopf	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	5	50-100	Stängel kahl (manchmal ist Basis behaart); gefiederte Rosettenblätter; Stängelblätter mit wenigern Fiedern	7-11	7x F (2xG2 1x G3): Wiesenknopf-Ameisenbläulings <i>Glaucopsyche nautithous</i> & Hellen Wiesenknopf-Ameisenbläulings <i>Glaucopsyche teleius</i> <i>Lycaena hippothoe</i> (LINNAEUS, 1761); Lilagold-Feuerfalter; 5xTagfalter, 1x Eulenfalter 2x Spinnerartige
<i>Sedum acre</i>	Scharfer Mauerpfeffer	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	6	5-15	kahl	7-8	WB
<i>Sedum album</i>	Weißer Fetthenne	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	9	indifferent	8-20	Stängel sind kahl	6-9	17 Falter: 5xSpanner, 10xTagfalter (4x Gefährdung 1 & 3x 2), 2xEulenfalter;
<i>Sedum dasyphyllum</i>	Buckel-Fetthenne	einheimisch	gefährdet & nicht besonders geschützt	7	indifferent	5-15	im oberen Teil drüsig behaart	5-8	Diptera, Hymenoptera
<i>Sedum rupestre (Sedum reflexum)</i>	Felsen-Fetthenne	einheimisch	nicht besonders geschützt	7	5	10-20	kahl, rosettig gehäufte Blätter	5-6	Diptera, Hymenoptera (B, WB (z.B. Spalten-Wollbiene ( <i>Anthidium oblongatum</i> ), Hu, We); F: Roter Apollo, Nachtfalter. <i>Acronicta euphorbiae</i> ; <i>Idaea contiguaris</i> ; Fetthennens-Felsflur-Kleinspanner, Geometridae; Spanner
<i>Sempervivum arachnoideum</i>	Spinnweb-Hauswurz	einheimisch	extrem selten & besonders geschützt	9	3	5-15	Pflanzen mit zumindest in der Vegetationszeit mehr oder weniger starker spinnwebiger Behaarung, die die Blattspitzen untereinander verbindet	6-7	WB (Spalten-Wollbiene ( <i>Anthidium oblongatum</i> ))
<i>Sempervivum tectorum</i>	Dachwurz	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & besonders geschützt	8	indifferent	10-60(-100)	Blütentriebe sind an ihrer Basis bewimpert und flaumhaarig; Blätter beiderseits kahl, aber randlich bewimpert	6-9	Apollofalter; WB; Erdhummel
<i>Thymus serpyllum</i>	Sand-Thymian	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	6	2-10	Am Grund sind die Blätter bewimpert, die Spreite ist nur selten behaart	7-9	B, WB, Hu, We; Zahlreiche F: Spanner, Tagfalter, Eulenfalter, Thymian-Widderchen (Spinnerartige) mit Gefährdungen von 1 bis 3
<i>Verbascum thapsus</i>	Kleinblütige Königskerze	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	indifferent	(30-) 60-180 (-200)	Stängel dicht wollig filzig und Blätter beiderseits von weißgrauem Filt bedeckt	6-8	Bienen, WB, Syrphiden, Käfer, Fliegen; F: 3 Eulenfalterarten

Tabelle 83: Pflanzenliste für extensive bis semi-intensive Dachbegrünung (vgl. Kapitel 8.5.2). Informationen zu den Pflanzen sind: Wissenschaftlicher und deutscher Artname; floristischer Status; Gefährdung (Einstufung in Rote-Liste-Kategorien); ökologische Zeigerwerte nach Ellenberg/Dierschke (2010): Lichtzahl für Halblichtpflanzen (7) bis Volllichtpflanzen (9), Temperaturzahl (Temp) für Mäßigwärmezeiger (5) bis extremer Wärmezeiger (9); Wuchshöhe; biologische Merkmale (Behaarung); Monat der Blühphase; Wechselbeziehungen im Nahrungsnetz (Insekten (I), Honigbienen (B), Wildbienen (WB), Hummeln (Hu), Wespen (We), (Schweb-)Fliegen (FI) und Schmetterlingen (Schm oder S) bzw. Falter (F) mit Gruppenzugehörigkeit und Auflistung der Gefährdung nach Rote Liste-Kategorien).

## 8.9.2. Kletterpflanzenliste für Fassadenbegrünung

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Artname	Floristischer Status	Gefährdung & Schutz	Lichtzahl	Temp	Wuchshöhe (cm)	Behaarung	PM10	PM2,5	Blühphase (1-12)	Nahrungsnetz
<i>Bryonia dioica</i>	Rotfrüchtige Zaunrübe	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	6	200-400	Blüten mit dicht behaarten Staubblattresten, Narbe rau haarig	0,22	0,22	6-9	Spinnerartige
<i>Calystegia sepium</i>	Echte Zaunwinde	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	6	kA	Blätter unbehaart bis 10 cm lang	0,22	0,21	5-9	8x Eulenfalter; Spanner
<i>Clematis vitalba</i>	Gewöhnliche Weinrebe	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	6	bis 3000	Perigonblätter beidseitig weiß filzig; Griffel abstehend behaart	0,05	0,05	7-9	10x Eulenfalter; 5x Spinnerartige; 23x Spanner
<i>Hedera helix</i>	Gewöhnlicher Efeu	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	4	5	50-2000	Die Rinde junger Sprossachsen sind mit stern- bis schildförmigen Haaren (Trichomen) flaumig bedeckt; Blätter sind kahl	0,35	0,26	9-10	5x Spanner; 2x Eulenfalter; Tagfalter
<i>Humulus lupulus</i>	Echter Hopfen	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	6	300-600	Blätter sehr rau haarig	0,28	0,27	7-8	Spanner; Spinnerartige; 5x Eulenfalter; Tagfalter
<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	Selbstkletternde Jungfernrebe	in Einbürgerung befindlicher Neophyt	nicht besonders geschützt	3	5	2000-3000	Blätter handförmig bis 15cm kahl	0,26	0,26	6-7	kA
<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	Dreispitziige Jungfernrebe	unbeständiger Neophyt	nicht besonders geschützt	3	5	über 2000	Oberseite der Blattspreite ist glänzend und kahl, unterseits sind diese mattgrün und weisen lediglich auf den Blattadern eine spärliche Behaarung auf	0,13	0,12	7-8	kA

Tabelle 84: Kletterpflanzenliste für Fassadenbegrünung (Kapitel 8.5.3). Informationen zu den Pflanzen sind: Wissenschaftlicher und deutscher Artname; floristischer Status; Gefährdung (Einstufung in Rote-Liste-Kategorien); ökologische Zeigerwerte nach Ellenberg/Dierschke (2010): Lichtzahl für Halblichtpflanzen (7) bis Volllichtpflanzen (9), Temperaturzahl (Temp) für Mäßigwärmezeiger (5) bis extremer Wärmezeiger (9); Wuchshöhe; biologische Merkmale (Behaarung); Feinstaubabscheidungspotential (PM10 und PM2,5); Monat der Blühphase; Wechselbeziehungen im Nahrungsnetz (Insekten (I), Honigbienen (B), Wildbienen (WB), Hummeln (Hu), Wespen (We), (Schweb-)Fliegen (Fl) und Schmetterlingen (Schm oder S) bzw. Falter (F) mit Gruppenzugehörigkeit und Auflistung der Gefährdung nach Rote Liste-Kategorien).

### 8.9.3. Staudenpflanzenliste semi-intensive bis intensive Dachbegrünungen, Fassadenbegrünung und Außenanlagen

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Artnamen	Floristischer Status	Gefährdung & Schutz	Lichtzahl	Temp	Wuchshöhe (cm)	Behaarung	Blühphase (1-12)	Nahrungsnetz
<i>Aethionema saxatile subsp. saxatile</i>	Steintäschel (Unterart)	einheimisch	nicht besonders geschützt	9	4	5-25	kahl	4-6	S, I, Schwebfliegen, Bienen
<i>Arabis bellidifolia</i>	Zwerg-Gänsekresse	einheimisch	nicht besonders geschützt	9	2	5-25	Rosettenblätter von Haaren rau	6-8	S, I, Schwebfliegen, Bienen
<i>Astragalus alpinus</i>	Alpen-Tragant	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	9	2	5-20	Hülsen schwarz zottelig behaart; oberirdischen Pflanzenteile sind zerstreut mit Haaren	6-8	S, I, Hummel
<i>Biscutella laevigata</i>	Glattes Brillenschötchen	einheimisch	besonders geschützt	8	indifferent	15-40	meist steifhaarig	5-7	I, Schwebfliegen, Bienen
<i>Calystegia soldanella</i>	Strand-Zaunwinde	einheimisch	vom Aussterben bedroht & streng geschützt	8	6	10-50	unbehaart	7-8	I, Bienen, Hummeln, Wespen, Bombyliden, Syrphiden
<i>Cerastium alpinum</i>	Alpen-Hornkraut	einheimisch	nicht besonders geschützt	9	1	5-10	Pflanze behaart	7-8	S, I, Syrphiden, Bienen, Falter
<i>Cerinth minor</i>	Kleine Wachsblume	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	6	bis 80	keine Haare	5-7	S, I, Hummeln, Bienen
<i>Chlorocrepis stacticifolia</i>	Grasnelkenhabichtskraut	einheimisch	gefährdet & nicht besonders geschützt	9	4	15-40	haarlos, außer Pappushaare	6-9	S, I
<i>Coronilla coronata</i>	Berg-Kronwicke	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	6	30-70	kahl gefiedert	5-7	I
<i>Dorycnium germanicum</i>	Seidiger Backenklees	einheimisch	gefährdet & nicht besonders geschützt	7	6	15-30 (45)	Blätter mit (kurz seidig) anliegender Behaarung; Kelch seidig behaart	7-8	I, Hymenopteren
<i>Dorycnium herbaceum</i>	Krautige Backenklees	einheimisch	vom Aussterben bedroht & nicht besonders geschützt	7	6	30-60	Blättchen abstehend behaart (oft verkahlend)	6-7	I, Hymenopteren
<i>Dracocephalum ruschiana</i>	Nordischer Drachenkopf	ausgestorbene einheimische Sippe	ausgestorben oder verschollen & besonders geschützt	6	5	10-30	Stängel kahl; Blätter kahl	7-8	S, I, Hummeln
<i>Echinacea purpurea</i>	Roter Sonnenhut	unbeständiger Neophyt	nicht besonders geschützt	7	5	50-120	Stängel und Blätter beidseitig rau behaart	5-10	S, Hu, WB
<i>Erodium cicutarium subsp. Cicutarium</i>	Gewöhnlicher Reiherschnabel (Unterart)	einheimisch	nicht besonders geschützt	8	6	10-40 (60)	Stängel behaart, Blätter gefiedert; Blütenstiele und Kelchblätter behaart	4-10	S, I
<i>Helichrysum arenarium subsp. arenarium</i>	Sand-Strohblume	einheimisch	gefährdet & besonders geschützt	8	6	10-50	Stängel grauweißfilzig; Blätter weißfilzig	7-10	I, Bienen, Hummeln, Wespen, Bombyliden, Syrphiden
<i>Inula hirta</i>	Rauhaariger Alant	einheimisch	gefährdet & nicht besonders geschützt	7	6	15-50	Stängel steifhaarig; Blätter beidseits stark rauhaarig; Hüllblätter steifhaarig	6-8	I, Bienen, Hummeln, Wespen, Bombyliden, Syrphiden



Wissenschaftlicher Name	Deutscher Artnamen	Floristischer Status	Gefährdung & Schutz	Lichtzahl	Temp	Wuchshöhe (cm)	Behaarung	Blühphase (1-12)	Nahrungsnetz
<i>Kerera saxatilis</i>	Felsen-Kugelschötchen	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	9	3	10-30	Stängel unten behaart; Grundblätter mit einfachen Haaren; Schötchen kahl	5-7	S, I, Syrphiden, Bienen, Falter
<i>Laser trilobum</i>	Rosskümmel	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & besonders geschützt	7	6	30-120	Stängel kahl	5-6	S, I, Käfer, Fliegen, Syrphiden, Wespen, Bienen mit halblangem Rüssel
<i>Laserpitium siler</i>	Berg-Laserkraut	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	indifferent	30-150	Stängel meist kahl; Hüllblätter kahl; Frucht kahl	6-8	S, I, Käfer, Fliegen, Syrphiden, Wespen, Bienen mit halblangem Rüssel
<i>Minuartia cherlerioides subsp. cherlerioides</i>	Polster-Miere	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	1	2-5	Blätter kahl	7-8	S, I, Syrphiden, Bienen, Falter
<i>Minuartia rupestris subsp. rupestris</i>	Felsen-Miere	einheimisch	extrem selten & nicht besonders geschützt	8	1	4-15	Blätter bewimpert	7-8	S, I, Syrphiden, Bienen, Falter
<i>Minuartia verna subsp. verna</i>	Frühlings-Miere	fehlt in Deutschland	nicht besonders geschützt	9	4	5-15	Stängel oben drüsenhaarig	5-8	I, Fliegenblume
<i>Oenothera biennis</i>	Zweijährige Nachtkerze	eingebürgerter Neophyt	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	kA	kA	80-180	drüsig behaarten Blütenstandsachse, wellige Blätter, Blattrosette	6-10	S, I Schwärmer
<i>Onobrychis montana subsp. montana</i>	Berg-Esparssette	einheimisch	gefährdet & nicht besonders geschützt	9	3	5-25		7-8	I, Hymenopteren
<i>Ononis repens</i>	Kriechende Hauhechel	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	5	15-30	Stängel ringsum gleichmäßig behaart	6-7	S, I, Bienenblume
<i>Ononis spinosa</i>	Dornige Hauhechel	einheimisch	nicht besonders geschützt	8	6	10-80	Stängel ab Mitte allseitig behaart	6-8	S, I, Bienenblume
<i>Oxytropis montana</i>	Berg-Spitzkiel	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	2	5-20	Stängel seidig behaart bis kahl; Frucht behaart bis verkahlend	7-8	I, Hymenopteren

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Artnamen	Floristischer Status	Gefährdung & Schutz	Lichtzahl	Temp	Wuchshöhe (cm)	Behaarung	Blühphase (1-12)	Nahrungsnetz
<i>Petrocallis pyrenaica</i>	Pyrenäen-Steinschmüchel	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & besonders geschützt	8	1	2-8	Blätter in dichter Rosette abstehend behaart, ohne verzweigte Haare; Fruchtsiel behaart	6-7	S, I, Syrphiden, Bienen, Falter
<i>Polygala alpestris</i> subsp. <i>Alpestris</i>	Alpen-Kreuzblümchen	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	2	5-15	kahl	6-7	S, I, Bienen bis Rüssellänge 7 mm
<i>Polygala amara</i> agg.	Bitteres Kreuzblümchen	einheimisch	nicht besonders geschützt	8	3	5-20	Blattrosette, kahl	5-6	I, Bienen, Hummeln, Wespen, Bombyliden, Syrphiden
<i>Polygala chamaebuxus</i>	Buchsblättriges Kreuzblümchen	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	6	4	10-20	junge Stängel sind abstehend behaart, im Alter zunehmend kahl	3-4	S, I, Bienen, Hummeln, Wespen, Bombyliden, Syrphiden, Hummelblume
<i>Polygala comosa</i>	Schopfiges Kreuzblümchen	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	6	5-30	Tragblätter meist bewimpert	5-7	S, I, Bienen bis Rüssellänge 7 mm
<i>Pulsatilla pratensis</i>	Wiesen-Küchenschelle	einheimisch	stark gefährdet & besonders geschützt	7	6	8-50	gesamte Pflanze ist dicht mit relativ langen seidigen weißen Haaren	4-6	S, I, Bienen, Hummeln, Wespen, Bombyliden, Syrphiden, Hummelblume
<i>Reseda lutea</i> subsp. <i>lutea</i>	Gelber Wau	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	6	30-70	lanzettig graue Blätter	6-9	I, Syrphiden, Bienen
<i>Rhodiola rosea</i>	Echte Rosenwurz	einheimisch	extrem selten & nicht besonders geschützt	7	4	15-40	sukkulent wechselständig	5-7	kA
<i>Senecio abrotanifolius</i> subsp. <i>abrotanifolius</i>	Eberrauten-Greiskraut	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	3	10-40	locker behaart	7-9	I, Bienen, Hummeln, Wespen, Bombyliden, Syrphiden
<i>Valeriana saxatilis</i>	Felsen-Baldrian	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	2	10-30	Stängel randlich bewimpert	6-8	S, I, Bienen, Hummeln, Wespen, Bombyliden, Syrphiden

Tabelle 85: Staudenpflanzenliste für semi-intensive bis intensive Dachbegrünungen, Fassadenbegrünung und Außenanlagen (vgl. Kapitel 8.5.2 - 8.5.4). Informationen zu den Pflanzen sind: Wissenschaftlicher und deutscher Artnamen; floristischer Status; Gefährdung (Einstufung in Rote-Liste-Kategorien); ökologische Zeigerwerte nach Ellenberg/Dierschke (2010): Lichtzahl für Halblichtpflanzen (7) bis Volllichtpflanzen (9), Temperaturzahl (Temp) für Mäßigwärmezeiger (5) bis extremer Wärmezeiger (9); Wuchshöhe; biologische Merkmale (Behaarung); Monat der Blühphase; Wechselbeziehungen im Nahrungsnetz (allg. Insekten (I), Honigbienen (B), Wildbienen (WB), Hummeln (Hu), Wespen (We), (Schweb-)Fliegen (FI) und Schmetterlingen (Schm oder S) bzw. Falter (F) mit Gruppenzugehörigkeit und Auflistung der Gefährdung nach Rote Liste-Kategorien).

## 8.9.4. Klingehölzliste für semi-intensive bis intensive Dachbegrünungen, Fassadenbegrünungen und Außenanlagen

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Artnamen	Floristischer Status	Gefährdung & Schutz	Lichtzahl	Temp	Wuchshöhe (cm)	Behaarung	PM10	PM2,5	Blühphase (1-12)	Nahrungsnetz
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	Echte Bärentraube	einheimisch	stark gefährdet & besonders geschützt	6	indifferent	5-10	Blätter behaart, später kahl			3-6	2x Spanner
<i>Betula nana</i>	Zwerg-Birke	einheimisch	stark gefährdet & besonders geschützt	8	3	20-50 (-120)	junge Zweige kurz filzig haarig, später kahl; Blätter sind kahl			4-5	4x Spinnerartige; Spanner
<i>Buddleja davidii</i>	Gewöhnlicher Sommerflieder	eingebürgerter Neophyt	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	7	(100-) 300 (-500)	junge Stängel filzig; Blätter unterseits graufilzig; filzig behaarte Rinde	1,41	1,12	7-9	34x Eulenfalter; 9x Tagfalter; 3x Spinnerartige
<i>Carpinus betulus</i>	Hainbuche	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	4	6	600-2500	Blätter schwach seidig behaart			5-6	50x Raupen-Futterpflanze; 17x Eulenfalter; 14x Spanner; 19x Spinnerartige
<i>Corylus avellana</i>	Gemeine Hasel	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	6	5	100-400 (-2000)	Knospen am Rand bewimpert; Triebe sind kurzhaarig dicht besetzt; Blattstiel ist drüsig behaart; Blattoberseite ist zerstreut behaart	1,12	0,76	2-4	14x Spanner; 18x Eulenfalter; 22x Spinnerartige
<i>Cotoneaster integerrimus</i>	Gewöhnliche Zwergmispel	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	indifferent	(20-) 100-150 (300)	Blätter oberseits kahl, unterseits hell grünfilzig; Kelche kahl; Früchte kahl			5-6	KA
<i>Cotoneaster tomentosus</i>	Filz-Zwergmispel	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	5	100-200 (-300)	Blätter oberseits nie kahl, unterseits grün bis weißfilzig; Kelch behaart; Früchte dichtfilzig			5-6	KA
<i>Dryas octopetala</i>	Silberwurz	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	9	2	2-10	Blätter kahl, unterseits weißfilzig; Griffel der Fruchtblätter fedrig weiß behaart; Spalierstrauch meist angedrückt behaart			6-7	Spinnerartige
<i>Hippocrepis emerus subsp. emerus</i>	Strauchwicke (Unterart)	einheimisch	nicht besonders geschützt	7	6	50-200	Pflanze ist zerstreut behaart; Blätter sind kahl			4-6	KA
<i>Juniperus communis subsp. alpina</i>	Zwerg-Wacholder	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	9	2	20-50	niederliegender Strauch, Nadeln aufwärts gekrümmt			4-6	KA
<i>Rhamnus saxatilis</i>	Felsen-Kreuzdorn	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	6	max. 150	Bl. Lanzettlich leicht gezähnt			4-5	3x Spanner
<i>Ribes sanguineum</i>	Blut-Johannisbeere	unbeständiger Neophyt	nicht besonders geschützt	KA	KA	100-400	Blätter kahl runzlig, zahlreiche Blüentrauben	3,57	3,18	4-5	Bienenweide
<i>Salix repens subsp. Arenaria</i>	Dünen-Kriech-Weide	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	9	6	30-100	Sommerblätter oberseits mehr oder weniger dicht behaart bleibend, unterseits lang haarig silbrig			4-5	KA

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Artname	Floristischer Status	Gefährdung & Schutz	Lichtzahl	Temp	Wuchshöhe (m)	Behaarung	PM10	PM2,5	Blühphase (1-12)	Nahrungsnetz
<i>Salix rosmarinifolia</i> ( <i>Salix repens</i> s. subsp. <i>rosmarinifolia</i> )	Rosmarin-Weide	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	5	100-200	Fruchtknoten & latealisches Blatt behaarung			4-5	Eulenfalter
<i>Sorbus chamaemespilus</i>	Zwerg-Mehlbeere	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	3	60-150 (-300)	Blätter unten seitlich anfangs filzig, später ausverlehlend; Winterknospen sind bewimpert oder wollig behaarung			6-7	KA
<i>Sorbus intermedia</i>	Schwedische Mehlbeere	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	6	5	300-1000(-2000)	Blätter unten seitlich filzig behaarung	231	1,01	5-6	KA
<i>Viburnum lantana</i> L.	Wolliger Schneeball	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	5	200-400	Zweige durch graubraune Sternhaare dichtfilzig; Blätter grau filzig behaarung Trugdolden	1,00	0,41	4-6	2x Spanner; Tagfalter; 3x Spinnerartige; Eulenfalter
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	Runzelblättriger Schneeball	in Einbürgerung befindlicher Neophyt	nicht besonders geschützt	6	5	bis 400	Rinde dichtwollig mit Sternhaaren bedeckt (im ersten Jahr), später auskahl; Winterknospen sind wollig mit Sternhaaren bedeckt	9,76	7,85	4-6	ja, sehr

Tabelle 86: Kleingehölzliste für semi-intensive bis intensive Dachbegrünungen und Außenanlagen (vgl. Kapitel 8.5.2 und 8.5.4). Informationen zu den Pflanzen sind: Wissenschaftlicher und deutscher Artname; floristischer Status; Gefährdung (Einstufung in Rote-Liste-Kategorien); ökologische Zeigerwerte nach Ellenberg/Dierschke (2010): Lichtzahl für Halblichtpflanzen (7) bis Volllichtpflanzen (9), Temperaturzahl (Temp) für Mäßigwärmezeiger (5) bis extremer Wärmezeiger (9); Wuchshöhe; biologische Merkmale (Behaarung); Feinstaubabscheidungspotential (PM10 und PM2,5); Monat der Blühphase; Wechselbeziehungen im Nahrungsnetz (allg. Insekten (I), Honigbienen (B), Wildbienen (WB), Hummeln (Hu), Wespen (We), (Schweb-)Fliegen (Fl) und Schmetterlingen (Schm oder S) bzw. Falter (F) mit Gruppenzugehörigkeit und Auflistung der Gefährdung nach Rote Liste-Kategorien).

## 8.9.5. Baumartenliste für Außenanlagen

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Artname	Floristischer Status	Gefährdung & Schutz	Lichtzahl	Temp	Wuchshöhe (cm)	Behaarung	PM10	PM2,5	Blühphase (1-12)	Nahrungsnetz
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Berg-Ahorn	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	4	indifferent	800-3000	Knospen randlich bewimpert; Blütenstiele kahl; Blattspreite ist auf Blattadern leicht behaart			4-5	8x Spinnerartige; 4x Eulenfalter; 5x Spanner
<i>Aesculus hippocastanum</i>	Roskastanie	unbeständiger Neophyt	nicht besonders geschützt	7	6	bis 2500	Blätter oberseitig kahl, unterseits hellgrün mit filzigen Adern	182 g tree-1 (Paoletti et al. 2011)		4-6	Eulenfalter; Spinnerartige
<i>Betula pendula</i>	Hänge-Birke	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	indifferent	bis 2600 (-3000)	alte Zweige kahl			4-5	27x Spinnerartige; 6x Eulenfalter; 4x Spanner; 3x Tagfalter
<i>Fraxinus excelsior</i>	Gemeine Esche	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	4	5	bis 4000	Zweige kahl; Knospen haben filzige Haare; Blätter oberseitig kahl, unterseits lockerfilzig behaart			3-5	12x Spinnerartige; 11x Eulenfalter; 3x Spanner; 2x Tagfalter
<i>Malus domestica</i>	Kultur-Apfel	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	kA	kA	300-1000	Knospen flaumig behaart; Blätter unterseits dichter, bleibend behaart bis filzig			4-6	14x Spinnerartige; 9x Eulenfalter; 2x Spanner
<i>Pinus mugo</i>	Krummholz-Kiefer	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	8	3	300-500	Nadeln			6-7	Tagfalter; Spinnerartige
<i>Pinus pinea</i>	Pinie	nicht heimisch	nicht besonders geschützt	9	8	2500-3000	Nadeln	164 g tree-1 (Paoletti et al. 2011)		Frühjahr	kA
<i>Pinus sylvestris</i>	Waldkiefer	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	7	indifferent	bis 4800	Nadeln			4-5	12x Spanner; 5x Spinnerartige; 2x Eulenfalter
<i>Prunus avium</i>	Vogel-Kirsche	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	4	5	1500-2000 (-3000)	Blattstiel und Zweige kahl; Blattoberseite ist kahl, bei Blattunterseite sind die Nerven anfangs leicht behaart			4-5	9x Spinnerartige; 7x Eulenfalter; 4x Spanner; 2x Tagfalter
<i>Salix cinerea</i>	Grau-Weide	einheimisch	nicht besonders geschützt	4	3	200-400 (-600)	relativ dichte Behaarung			3-4	11x Spinnerartige; 9x Eulenfalter; Spanner; 10x Tagfalter
<i>Skimmia japonica</i>	Skimmia japonica	nicht heimisch	nicht besonders geschützt	kA	kA	bis 700	Blätter ledrig rosettig			Frühjahr	kA
<i>Sorbus intermedia</i>	Schwedische Mehlbeere	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschützt	6	5	300-1000(-2000)	Blätter unterseits filzig behaart	2,31	1,01	5-6	Fliegen, Schmetterlinge, Käfer und Bienen

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Artnamen	Floristischer Status	Gefährdung & Schutz	Lichtzahl	Temp	Wuchshöhe (cm)	Behaarung	PM10	PM2,5	Blühphase (1-12)	Nahrungsnetz
<i>Tilia cordata</i>	Winter-Linde	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschätzt	5	5	1000-2500	junge Triebe anfänglich behaart, später aus verkahlend; Blätter oberseits kahl, unterseits in den Nervenachsen zunächst weißlich, später aus bräunlich gebändert, sonst kahl			6-7	9x Spinnwebartige; 9x Eulenfalter; Spanner; 2x Tagfalter; Hu; B
<i>Tilia tomentosa</i>	Silber-Linde	in Einbürgerung befindlicher Neophyt	nicht besonders geschätzt	6	5	2500-3000	Rinde der Zweige im Frühsommer mit weißfilzigen Haaren bedeckt; Blattunterseite weißfilzig			7-8	Spinnwebartige; Eulenfalter; Spanner; Tagfalter; Hu; B
<i>Ulmus glabra</i>	Berg-Ulme	einheimisch	nicht als gefährdet angesehen & nicht besonders geschätzt	4	5	3000-4000	Knospen und Zweige sind behaart; Blätter unterseits kurzhaarig			3-4	Eulenfalter; 2x Spanner; 3x Tagfalter
<i>Ulmus x hollandica</i>	Bastard-Ulme	kA	nicht besonders geschätzt	4	5	bis 4000	Blätter unterseits meist nur entlang der Nerven behaart; Triebe behaart			3-4	Eulenfalter; Tagfalter

Tabelle 87: Baumartenliste für Außenanlagen (vgl. Kapitel 8.5.4). Informationen zu den Pflanzen sind: Wissenschaftlicher und deutscher Artnamen; floristischer Status; Gefährdung (Einstufung in Rote-Liste-Kategorien); ökologische Zeigerwerte nach Ellenberg/Dierschke (2010): Lichtzahl für Halblichtpflanzen (7) bis Volllichtpflanzen (9), Temperaturzahl (Temp) für Mäßigwärmezeiger (5) bis extremer Wärmezeiger (9); Wuchshöhe; biologische Merkmale (Behaarung); Feinstaubabscheidungspotential (PM10 und PM2,5); Monat der Blühphase; Wechselbeziehungen im Nahrungsnetz (allg. Insekten (I), Honigbienen (B), Wildbienen (WB), Hummeln (Hu), Wespen (We), (Schweb-)Fliegen (Fl) und Schmetterlingen (Schm oder S) bzw. Falter (F) mit Gruppenzugehörigkeit und Auflistung der Gefährdung nach Rote Liste-Kategorien).

## 9. Einfluss der Begrünung auf das Mikroklima und den Innenraumkomfort

Die Begrünung von Freiflächen wirkt sich positiv auf das Mikroklima in Städten aus und ist in der Lage den städtischen Wärmeinseleffekt zu reduzieren. Eine Dachbegrünung bei hohen Gebäuden wirkt sich nicht oder nur unmerklich auf die Aufenthaltsqualität auf Straßenniveau aus. Die entscheidenden Verbesserungen für die thermische Behaglichkeit im Außenraum können im Sommerfall durch Bäume erzielt werden. Die positive Wirkung ergibt sich als eine Kombination aus Beschattung und Lufttemperaturreduktion durch Verdunstungskühlung (Evapotranspiration). Dabei wirkt sich eine Begrünung auch auf den Heizwärme- und Kühlbedarf von Gebäuden aus (Ng et al. 2012; Skelhorn/Levermore/Lindley 2016; Raji/Tenpierik/van den Dobbelsteen 2015).

### 9.1. Software

Für die Mikroklimasimulationen wurde die Software ENVI-MET in der Version 4.4 verwendet.

### 9.2. Außenraumkomfort

Im Folgenden werden die Auswirkungen verschiedener Begrünungsszenarien, Wasserflächen und Oberflächengestaltungen von Straßen auf die Lufttemperatur und den Außenraumkomfort untersucht.

Zur Beurteilung des Außenraumkomforts wird die physiologisch äquivalente Temperatur (physiological equivalent temperature (PET)) verwendet. PET beschreibt die Lufttemperatur in einem Innenraum mit typischen Randbedingungen, bei der die Kern- und Hauttemperatur des Körpers dieselben Werte aufweist, um eine ausgeglichene Wärmebilanz zu erreichen, wie unter den komplexen Außenraumbedingungen. Dementsprechend wird auch die physiologisch äquivalente Temperatur in °C ausgedrückt (s. Tabelle 88). Die Innenraumbedingungen sind dabei wie folgt definiert: Die mittlere Strahlungstemperatur entspricht der Lufttemperatur, die Luftgeschwindigkeit beträgt 0,1 m/s, der Wasserdampfdruck beträgt 12 hPa (entspricht 50 % r. F. bei 20 °C) (Höppe 1999).

Tabelle 88: Physiological equivalent temperature (PET)-Index in °C (Höppe 1999)

PET in °C	Thermal perception	Grade of physiological Stress
< 4	Very cold	Extreme cold stress
4 - 8	Cold	Strong cold stress
8 - 13	Cool	Moderate cold stress
13 - 18	Slightly cool	Slight cold stress
18 - 23	Comfortable	No thermal stress
23 - 29	Slightly warm	Slight heat stress
29 - 35	Warm	Moderate heat stress
35 - 41	Hot	Strong heat stress
> 41	Very hot	Extreme heat stress

## 9.3. Pflanzenauswahl

### 9.3.1. Begrünung Außenanlage

Um eine nachhaltige Entwicklung zu unterstützen müssen bei der Pflanzenauswahl für die Begrünung von Gebäuden und Außenflächen zahlreiche Faktoren berücksichtigt werden (s. Kapitel 8.5.4). Die Pflanzenauswahl wirkt sich erheblich auf die Ökosysteme und Ökosystemdienstleistungen aus.

Infolge der großen Anzahl an Pflanzen, die für die Begrünung von Außenanlagen verwendet werden können, wurde eine Auswahlliste auf Grundlage der BNB-Systemvariante Außenanlagen, Kriterium 1.1.4 Biodiversität, Anlagen 1 bis 4 erstellt. Die Pflanzenauswahl wurde auf Grundlage folgender Kriterien durchgeführt:

- Einheimische Arten,
- Bienen- oder Vogelnährgehölze sowie Vogelschutzgehölze,
- Feinstaubabscheidung,
- Verschattungseigenschaften,
- Eignung für private Gärten.

Um die genannten Kriterien möglichst umfassend zu erfüllen, wurden die vorausgewählten Pflanzen weiter mit den Datenbanken floraweb des Bundesamts für Naturschutz und citree der Technischen Universität Dresden analysiert. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden dann Pflanzen ausgewählt, deren Pflanzenparameter im Idealfall Ähnlichkeit zu anderen vorteilhaften Pflanzen aufweisen, die im Auswahlprozess identifiziert wurden. Die ausgewählten Pflanzen wurden anschließend auf Ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber den projizierten Klimaveränderungen überprüft. Hierfür wurde die Klima-Arten-Matrix von Roloff/Korn/Gillner (2009) herangezogen. Diese teilt 250 verschiedene Gehölzarten bezüglich ihrer Dürre-resistenz und Resistenz gegen Spätfrost in jeweils vier Kategorien ein. Durch die Kombination der beiden Beurteilungsgrößen entsteht eine Matrix aus insgesamt 16 möglichen Bewertungskombinationen. Da für die Pflanzenauswahl ausschließlich einheimische Arten gewählt wurden, weisen diese prinzipiell eine ausreichende Frostresistenz auf. Wesentliche Unterschiede ergeben sich folglich hinsichtlich der Dürre-resistenz.

Der Kultur-Apfel (*Malus domestica*), die Kultur-Birne (*Pyrus communis*), die Zwetschge (*Prunus domestica*) und die Kirsche (*Prunus avium*) sind sehr bedeutend für die Biodiversität von Insekten und Vögeln. Die Blüten werden von verschiedenen Arten von Schmetterlingen, Bienen, Wildbienen und Hummeln besucht. Die reifen Früchte bieten zudem ein Nahrungsangebot für kleinere Säugetiere. Apfelbäume sind relativ klein und somit auch für kleinere Gärten geeignet (Höhe: 6 bis 8 m, Breite: 4 bis 6 m). Empfehlenswert ist die Verwendung alter Apfelsorten, die bereits vor den 1940er Jahren in Deutschland einheimisch waren. Durch die Vielzahl der hier zur Auswahl stehenden Obstbaumsorten können ohne Probleme solche mit hoher Dürre-resistenz gewählt werden.

Die Grundstücksgröße der Musterliegenschaft und auch der untersuchten Siedlungsräume lässt die Pflanzung größerer Bäume zu. Sommergrüne Laubbäume sind dabei zu bevorzugen, da sie im Sommer eine effektive Verschattung und hohe Evapotranspiration bieten, während sie im Winter das Sonnenlicht zumindest teilweise durchlassen und somit solare Wärmegegewinne und ausreichende Tageslichtversorgung in den Innenräumen erreicht werden können. Laubbäume wie Eiche und Pappel sind für übliche private Gärten wegen ihrer Größe und des großen Wurzelwerks eher ungeeignet. Birken sind zwar schnell wachsend aber anfällig bei Sturmereignissen. Aus diesem Grund wurde für die ENVI-MET-Simulationen die Winterlinde (*Tilia cordata*) ausgewählt. Sie erreicht eine Höhe zwischen 20 und 30 m, bei einer Breite von 10 bis 20 m. Dabei leistet die Winterlinde mit ihrer hohen Zuckerkonzentration im Nektar einen wichtigen Beitrag zur Biodiversität.



Die Blüten werden von zahlreichen Schmetterlingsarten, Bienen, Wildbienen und Hummeln besucht. Von der Wuchsform und den positiven Eigenschaften für die Biodiversität ist die Silber-Linde (*Tilia tomentosa*) sehr ähnlich. Allerdings weist sie infolge der rauen Blattoberseite und den weißen Härchen an der Blattoberseite ein höheres Feinstaubbindungspotential auf und ist widerstandsfähiger gegen Staub und Rauch aus Industrie und Verkehr. Des Weiteren ist die Silber-Linde gegenüber der Winterlinde noch widerstandsfähiger gegen Trockenheit. Tatsächlich unterscheiden sich die für ENVI-MET zu definierenden Pflanzenparameter zwischen Winterlinde und Silber-Linde nur geringfügig. Im Frühjahr blüht als erster Strauch die gemeine Hasel. Damit bietet sie unterschiedlichsten Insekten das erste Nahrungsangebot des Jahres. Ihre Früchte dienen im Herbst als Nahrungsgrundlage für Vögel und kleine Säugetiere. Die Feinstaubadsorption wird entsprechend der Datenbank citree als hoch eingeschätzt. Im Hinblick auf die Bereitstellung eines Nahrungsangebots für Insekten und Vögel ist die Hainbuche gegenüber der gemeinen Hasel deutlich unterlegen. Auch die Feinstaubadsorption ist im Vergleich zur gemeinen Hasel geringer. Demgegenüber ist ihre Widerstandsfähigkeit gegen Trockenheit besser. Das bedeutet hier müssen gewisse Kompromisse eingegangen werden. Zur Erhöhung der biologischen Vielfalt sollte jedoch prinzipiell nicht nur eine Art von Büschen gepflanzt werden (vgl. Kapitel 8.5.4).

Für die Abbildung von Bäumen in den Mikroklimasimulationen wurden die Pflanzenparameter der folgenden Arten verwendet:

- Apfelbaum - *Malus domestica*,
- Winterlinde - *Tilia cordata*.

Für die Abbildung von Hecken und Büschen in den Mikrosimulationen wurden die Pflanzenparameter der folgenden Arten verwendet:

- Gemeine Hasel - *Corylus avellana*,
- Hainbuche - *Carpinus betulus*.

### 9.3.2. Begrünung Flachdach

Die Begrünung von Flachdächern ist eine Maßnahme, die bei Neubauten heutzutage häufig angewendet wird. Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme und Aufbauvarianten. Die Substrathöhe bzw. die durchwurzelbare Aufbaudicke entscheiden darüber, welche Pflanzen und Vegetationsformen realisiert werden können (FLL 2018a: 57; Catalano et al. 2018: 16). In Abhängigkeit der Substratdicke und damit der möglichen Pflanzenauswahl sowie dem Aufwand zur Herstellung und Pflege werden drei Dachbegrünungsarten unterschieden:

- Extensivbegrünung,
- Intensivbegrünung,
- Einfache Intensivbegrünung (semi-intensiv).

Auf die detaillierten Bauteilaufbauten eines begrünten Flachdachs sowie eines Retentionsdachs wurde bereits in Kapitel 7.4.4 eingegangen. In Kapitel 8.5.2 wurden ebenso bereits detaillierte Ausführungen zu Dachbegrünungsmöglichkeiten gegeben.

Bei der Extensivbegrünung handelt es sich um naturnah gestaltete Vegetationsformen, wie sie in vergleichbaren Extremstandorten natürlich vorkommen. Es werden robuste Pflanzen gewählt, die den Extrembedingungen auf einem Flachdach mit hoher Sonneneinstrahlung und unter Umständen länger anhaltender Trockenheit angepasst sind. Die Pflanzen sollten robust sein und eine hohe Regenerationsfähigkeit aufweisen. Zudem sollten sie sich mühelos vermehren, damit nach Extremereignissen, mit dem Absterben einzelner Pflanzen eine schnelle Wiederbesiedelung sichergestellt wird. Die durchwurzelbare Aufbaudicke extensiv begrünter Flachdächer beträgt zwischen 6 cm und 20 cm. Als Pflanzen kommen typischerweise

Moose, Sukkulenten, Kräuter, Gräser und unter Umständen Stauden in Betracht. Extensiv begrünte Dächer weisen einen sehr geringen Pflegeaufwand auf.

Intensivbegrünungen können die gleiche Nutzungs- und Gestaltungsvielfalt wie gewöhnliche Außenanlagen erreichen. Die Substrathöhen liegen zwischen 15 cm bis zu 20 cm. Bei Substrathöhen von 60 cm und mehr können Büsche und sogar Bäume gepflanzt werden. Diese Form der Dachbegrünung benötigt eine umfangreiche Pflege mit regelmäßiger Bewässerung, Nährstoffgabe und Rückschnitt. Entsprechende Pflege- und Wartungsarbeiten müssen vier- bis achtmal jährlich durchgeführt werden. Durch die hohe zusätzliche Auflast muss das Tragwerk des Gebäudes entsprechend ausgebildet werden. Dieser erhöhte Materialaufwand beeinflusst nicht unwesentlich die von der Konstruktion gebundene Graue Energie.

Einfache Intensivbegrünungen, auch als semi-intensive Begrünungen bezeichnet, liegen bezüglich Pflanzenvielfalt und Pflegeaufwand zwischen Intensiv- und Extensivbegrünung. Es wird eine bodenbedeckende Begrünung ausgebildet die häufig aus Gräsern, ganzjährigen Kräutern, Stauden und Gehölzen bestehen. Der Pflegeaufwand reduziert sich im Vergleich zur Intensivbegrünung auf zwei bis vier Mal pro Jahr (FLL 2018a; Catalano et al. 2018).

Die entsprechende Schweizer Norm (SN 564312, SIA 312: 2013) und die italienische Norm (UNI 11235:2015) unterscheiden dazu sechs Ebenen mit unterschiedlichen Substratstärken, während in der britischen Dachbegrünungsrichtlinie (GRO 2014) eine weitere Kategorie vorgesehen ist. Das „Artenreiche Gründach“ beinhaltet hohe biodiversitätsfördernde Maßnahmen und positioniert sich damit zwischen „extensiv“ und „einfach intensiv“.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal von Gründächern ist die Anzahl von Funktionsschichten. Es wird unterschieden zwischen:

- Mehrschichtiger Bauweise,
- Einschichtiger Bauweise.

Bei der mehrschichtigen Bauweise werden die Funktionen Ernährung der Pflanzen, Filterung und Drainage durch verschiedene Schichten erbracht. Die Drainage des Substrats ist erforderlich um Staunässe zu vermeiden, gleichzeitig gibt es Konzepte, bei denen innerhalb der Drainageschicht Wasser gespeichert wird, welches in Trockenperioden über die tiefsten Wurzel der Pflanzen verfügbar ist. Die Filterschicht verhindert den Eintrag feiner Substratbestandteile in die Drainageschicht. Als Drainageschicht kommen Schüttstoffe, Drainagematten und Drainageplatten zum Einsatz. Bei der einschichtigen Bauweise übernimmt eine speziell zusammengesetzte Substratschicht auch die Drain- und Filterfunktionen (FLL 2018a).

Infolge der fast uneingeschränkten Pflanzenauswahl können intensiv begrünte Dächer sicher den größten Beitrag zu einer Erhöhung der Artenvielfalt liefern. Eine intensive Dachbegrünung wird bei Einfamilienhäusern wie der Musterliegenschaft sehr selten ausgeführt. Zudem ist sie mit erheblichen Materialverbräuchen auch infolge der sehr hohen Lasten, einem hohen Pflegeaufwand und damit hohen Kosten verbunden. Deshalb wurde im vorliegenden Beispiel die Auswahl der Dachbegrünung auf extensive Formen beschränkt. In einer wissenschaftlichen Studie wurde untersucht, wie sich die Kombination und Auswahl von Pflanzen für extensive Dachbegrünungen auf die Ökosystemdienstleistungen sommerliche Dachkühlung und Regenwasserretention auswirken. In die Untersuchung wurden folgende Lebensformen einbezogen: Gräser, Sukkulenten, Stauden, hohe Stauden, kriechende Sträucher. Es wurden Monokulturen aus einzelnen Arten, Kombinationen verschiedener Arten derselben Lebensform und die Kombination aus drei oder fünf verschiedenen Lebensformen untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Kombination aus hohen Stauden, Gräsern und Sukkulenten bezüglich Biodiversität und Ökosystemdienstleistungen besonders gute Ergebnisse erzielt (Lundholm et al. 2010) vgl. Kapitel 8.7 und 9.4.2.

Stauden, Gräser und Sukkulenten sind vielfältige Wuchsformen mit zahlreichen Gattungen, sodass viele verschiedene Pflanzenarten zur Auswahl stehen. Zur Ermittlung der Pflanzenparameter für die Simulation in ENVI-MET wurden für hohe Stauden die folgenden Pflanzen verwendet: Luzerne (*Medicago sativa*), Fingerhut (*Digitalis*) und die Gemeine Nachtkerze (*Oenothera biennis*). Für die Pflanzenparameter von Gras wurde auf allgemeine Daten der Pflanzenfamilie der Süßgräser (*Poaceae*) zurückgegriffen. Die erforderlichen Daten von Sukkulenten entstammen den Arten Weiße Fetthenne (*Sedum album*), Scharfer Mauerpfeffer (*Sedum acre*) und Echte Rosenwurz (*Rhodiola rosea*). Die für die Simulation notwendigen Pflanzenparameter wurden recherchiert. Innerhalb einer Gattung unterscheiden sich die Eigenschaften der genannten Arten nur geringfügig, sodass bei fehlenden Angaben auf Parameter der anderen Arten ausgewichen wurde.

### 9.3.3. Begrünung Fassade

Für die Fassadenbegrünung kommen prinzipiell bodengebundene und wandgebundene Systeme zum Einsatz. Für bodengebundene Fassadenbegrünungen können Selbstklimmer oder Gerüstkletterpflanzen gewählt werden. Beiden Varianten ist gemein, dass die Pflanzen direkt ins Erdreich gepflanzt werden. Selbstklimmer wachsen mittels Haftwurzeln oder Haftscheiben direkt an der Wandoberfläche empor und benötigen keine Kletterhilfen. Allerdings ist zu beachten, dass die Wandoberflächen, die bewachsen werden soll, hierfür geeignet sind. Gerüstkletterpflanzen benötigen Sekundärkonstruktionen als Wuchshilfe. Zu Details vgl. Pfoser et al. (2013), FLL (2018b) und Pfoser (2018).

Für die Begrünung niedriger Gebäude, wie bei der vorliegenden Musterliegenschaft, eignen sich bodengebundene Fassadenbegrünungen, da die Pflanzen relativ schnell die erforderliche Wuchshöhe erreichen können. Vorteile der bodengebundenen Systeme sind der geringe Investitions-, Pflege- und Instandhaltungsaufwand. Des Weiteren ist der Bewässerungs- und Düngungsaufwand geringer als bei wandgebundenen Systemen. Zudem ist kein zusätzlicher (Selbstklimmer) oder nur geringer zusätzlicher Materialaufwand für die Wuchshilfen (Gerüstkletterpflanzen) erforderlich, wodurch die Graue Energie und die grauen Emissionen gering gehalten werden.

Ein typischer Selbstklimmer für die Fassadenbegrünung ist Efeu. Es existieren verschiedene einheimische Arten. Für die Simulationen in ENVI-MET wurde Gemeiner Efeu (*Hedera helix* Woerner) verwendet. Efeu ist immergrün und ist damit in der Lage auch im Winter, wenn die Belastung besonders hoch ist, Feinstaub zu adsorbieren. *Hedera helix* erreicht mittlere Wuchshöhen von bis zu 15 m (FLL 2018b: 140). Für die wandgebundene Fassadenbegrünung werden Moose im Normalfall auf Modulen vorkultiviert, die häufig ohne oder mit geringen baukonstruktiven Veränderungen an der Wand befestigt werden können. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber den bodengebundenen Systemen, da mit Fertigstellung der Grünfassade direkt das gewünschte Erscheinungsbild erzielt werden kann. Moose können auf fast jeder Oberfläche wachsen. Auf dem Markt sind Systeme erhältlich, bei denen das Moos auf dünnen Betonelementen oder in befüllten Drahtkörben wächst.

Moose haben einige Eigenschaften, die sie für die Fassaden- und Dachbegrünung besonders interessant machen. Aufgrund ihrer Austrocknungstoleranz benötigen die meisten Moosarten keine permanente Wasserverfügbarkeit. Sie können über längere Zeiträume austrocknen und erlangen nach Rehydrierung wieder ihre volle physiologische Funktionsfähigkeit. Zudem sind sie in der Lage ein Vielfaches ihres Trockengewichts an Wasser zu speichern und zeitversetzt über Evapotranspiration an die Umgebung abzugeben. Durch die hohe Verdunstungsrate können relativ hohe Kühlleistungen erreicht werden. Des Weiteren weisen Moose einen sehr hohen Blattflächenindex und somit eine große Fläche zur Feinstaubabscheidung auf. Gegenüber Höheren Pflanzen sind Moose tatsächlich in der Lage Feinstaub und Schwermetalle zu binden und in die Zelle einzulagern (vgl. Kapitel 8.8).

Gemäß FLL (2018b: 149) haben sich u.a. das Graue Zackenmützenmoos (*Racomitrium canescens*), das Vielzahnbirnmoos (*Bryum capillare*) und das Purpurstielige Hornzahnmoos (*Ceratodon purpureus*) für die Fassadenbegrünung in der Praxis bewährt. Das Graue Zackenmützenmoos (*Racomitrium canescens*) wird in Deutschland als zurückgehend eingestuft. Größere Bestände finden sich nur noch in den Alpen, im Jura und Nahebergland. Das Haarblättrige Vielzahnbirnmoos (*Bryum capillare*) und das Purpurstielige Hornzahnmoos (*Ceratodon purpureus*) sind verbreitet und ungefährdet (Oliver Dürhammer 5. 11. 2019).

Des Weiteren ist auch das Erd-Verbundzahnmoos (*Syntrichia ruralis* – ehemals: *Tortula ruralis*) für Fassaden- und Dachbegrünungen geeignet. Neben Felsen, Steinen, flachgründiger Erde sowie Holz und Rinde besiedelt es häufig auch Sekundärstandorte auf Beton, Eternitdächern und an Straßen- und Wegrändern. *Syntrichia ruralis* ist ungefährdet und sehr ausbreitungsfreudig, so dass sich in Deutschland größere Bestände finden.

#### 9.4. Musterliegenschaft

Die gegebenen Abmessungen des Gebäudes und des Grundstücks der Musterliegenschaft sowie die Bauteilaufbauten wurden in ENVI-MET so exakt wie möglich abgebildet. Die mikroklimatische Skala der ENVI-MET Modellierungssoftware Spaces erlaubt allerdings nur eine näherungsweise Abbildung. Das Modellierungsnetz für die Musterliegenschaft wurde zu 1 m x 1 m x 1 m definiert. Dementsprechend wurde das Grundstück der Musterliegenschaft durch ein gleich großes, rechteckiges Grundstück angenähert. Alle Wandbauteile und Fenster wurden entsprechend angenähert.

Die Mikroklimasimulationen an der Musterliegenschaft wurden für den Klimadatensatz der Expositions-klasse 2, sommer-fokussiertes Testreferenzjahr 2010 für die Referenzstation Potsdam, durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen an der DWD-Wetterstation Potsdam aufgezeichneten realen Jahreszeitraum und somit um ein bereits aufgetretenes Hitzeereignis. Sämtliche Mikroklimasimulationen wurden für einen Tag (24 h) durchgeführt.

##### 9.4.1. Ausgangsszenario

Als Ausgangsszenario wird davon ausgegangen, dass die Begrünung auf dem Grundstück lediglich aus einer Rasenfläche besteht. In Einfamilienhausgärten sind Rasenflächen in der Regel gut gepflegt und werden regelmäßig gemäht. Eine typische Rasenhöhe auf die gemäht wird sind 4 cm (Smith/Fellowes 2015). Um die Fauna zu erhalten, sollte Rasen nicht niedriger als 10 cm gemäht werden (s. Kapitel 8.5.4). Berücksichtigt man dabei, dass bei einem Mähvorgang nicht mehr als ein Drittel der Gesamthöhe entfernt werden sollten, darf der Rasen maximal auf 15 cm Höhe anwachsen. Folglich ist in Gärten mit Rasenhöhen zwischen 4 cm und 15 cm zu rechnen. Als Kompromiss wurde in allen Simulationen eine Grashöhe von 10 cm angesetzt.

Alle im folgenden gezeigten Ergebnisse der Mikroklimasimulationen gelten, wenn nicht explizit anders erläutert, für die Expositions-klasse 2 – sommer-fokussiertes Testreferenzjahr 2010 für die Repräsentanzstation Potsdam, am 27. Juli um 14.00 Uhr, in einer Betrachtungshöhe von 1,5 m über Geländeoberkante.

Im Ausgangsszenario zeigt sich, dass auf dem gesamten Grundstück zum Betrachtungszeitpunkt ein extremer Hitzestress vorherrscht. In kleinen Bereichen im Schatten des Gebäudes liegt die physiologisch äquivalente Temperatur unter 41,00 °C und damit Bereich des starken Hitzestress (Abbildung 126). Die Lufttemperaturen auf dem Grundstück der Musterliegenschaft variieren in einem kleinen Bereich zwischen 35,70 °C und 37,40 °C.

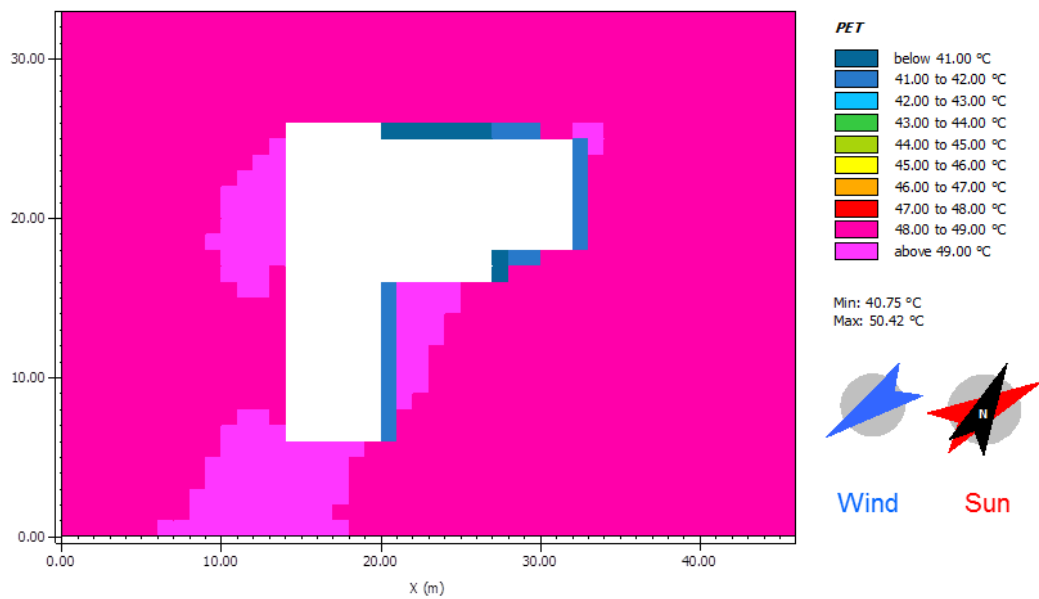


Abbildung 126: Musterliegenschaft, Ausgangsszenario, Potsdam 2010 Sommer, PET in °C um 14.00 Uhr

#### 9.4.2. Dachbegrünung

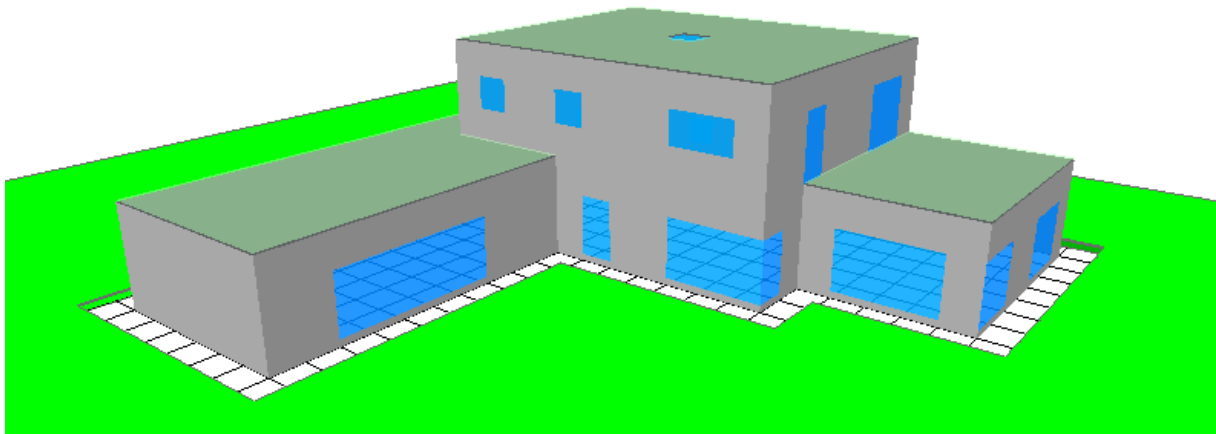


Abbildung 127: Musterliegenschaft mit Gründach

Für die Dachbegrünung wurden zwei Varianten simuliert. Zum einen eine Begrünung mit Moos, zum anderen eine extensive Dachbegrünung als Kombination aus Sukkulente, Gräsern und hohen Stauden, mit jeweils gleichen Flächenanteilen. Die Betrachtungshöhe für die Veränderung der Lufttemperatur wurde in diesem Fall abweichend auf 3,5 m über Geländeoberkante und damit knapp oberhalb der Dachfläche über Erdgeschoss festgelegt (Abbildung 128 und Abbildung 129). Es zeigt sich, dass das Moosdach einen geringfügig größeren Kühlungseffekt auf die umgebende Luft ausübt als das extensive Dach aus Sukkulente, Gräsern und hohen Stauden. Mit dem Moosdach kann eine maximale Lufttemperaturreduktion von 0,62 K erreicht werden, während das extensive Dach maximal 0,30 K erreicht. Das Grundmodell der Simulation ist in der Abbildung 127 dargestellt.

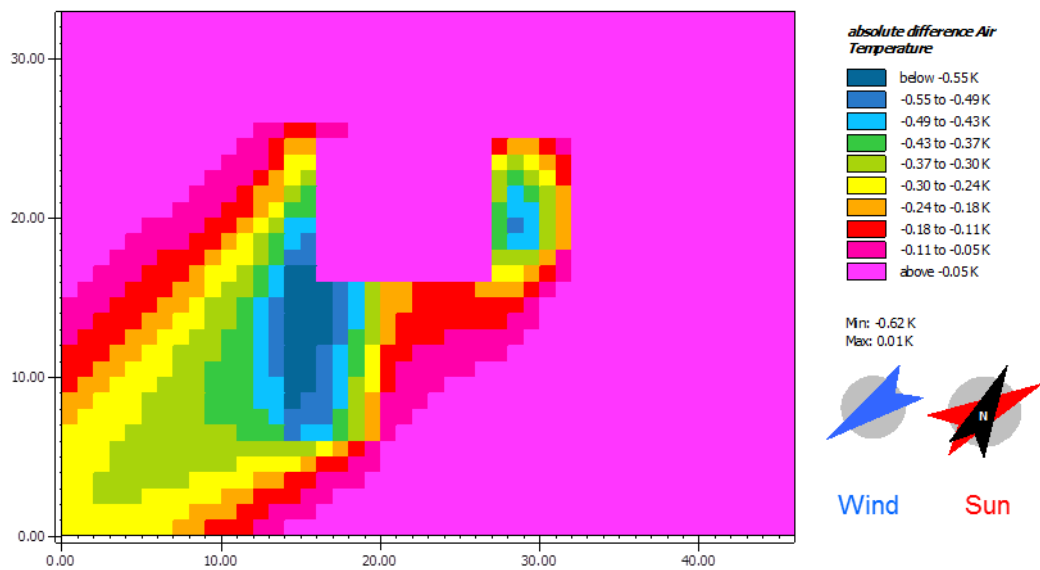


Abbildung 128: Lufttemperaturdifferenz in K zwischen Moosdach und bekiestem Dach, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr

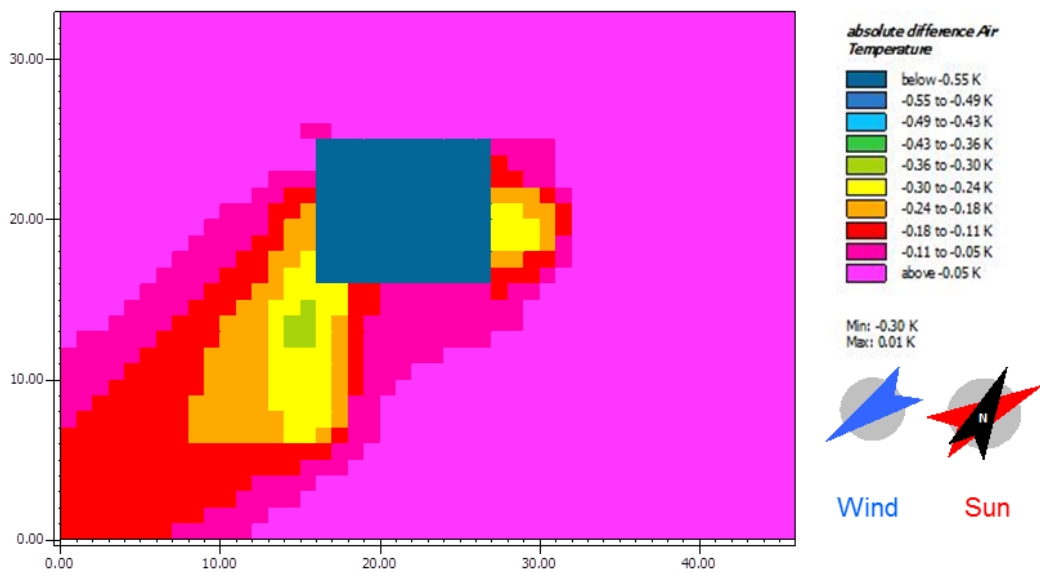


Abbildung 129: Lufttemperaturdifferenz in K zwischen extensiv begrüntem Dach und bekiestem Dach, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr

Da die physiologisch äquivalente Temperatur 1,5 m über Geländeoberkante ermittelt wird, sind die Effekte beider Dachbegrünungsvarianten im Hinblick auf den thermischen Außenraumkomfort im Garten vernachlässigbar.

### 9.4.3. Fassadenbegrünung

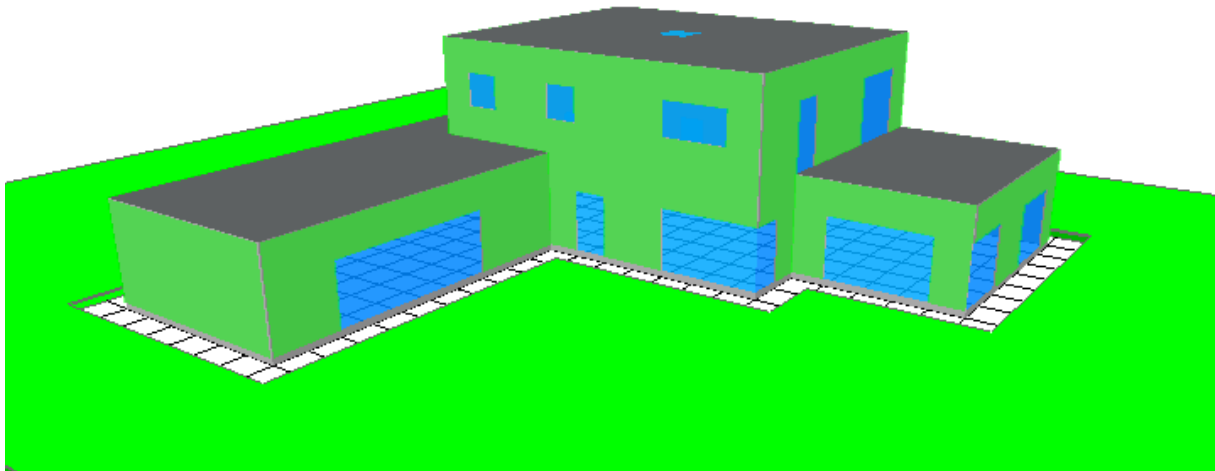


Abbildung 130: Musterliegenschaft mit Grünfassade

An der Musterliegenschaft wurden zwei Varianten der Fassadenbegrünung simuliert. Zum einen ein bodengebundener Direktbewuchs mit Efeu, zum anderen eine Moosfassade auf Trägerplatten. Es wurde davon ausgegangen, dass alle vertikalen Fassadenbereiche begrünt sind. Dabei zeigt sich, dass die Moosfassade einen höheren Kühleffekt auf die Luft bewirkt, als die efeubewachsene Fassade. In direkter Umgebung zu der Moosfassade wird die Luft um bis zu 0,40 K abgekühlt (Abbildung 131). Im Gegensatz dazu steigt die Lufttemperatur in der Nähe der efeubewachsenen Fassade zum Großteil sogar geringfügig an (Abbildung 132). Nur in sehr kleinen Bereichen kann eine Lufttemperaturreduktion von maximal 0,09 K festgestellt werden. Das Modell der Simulation mit begrünter Fassade ist in der Abbildung 130 dargestellt.

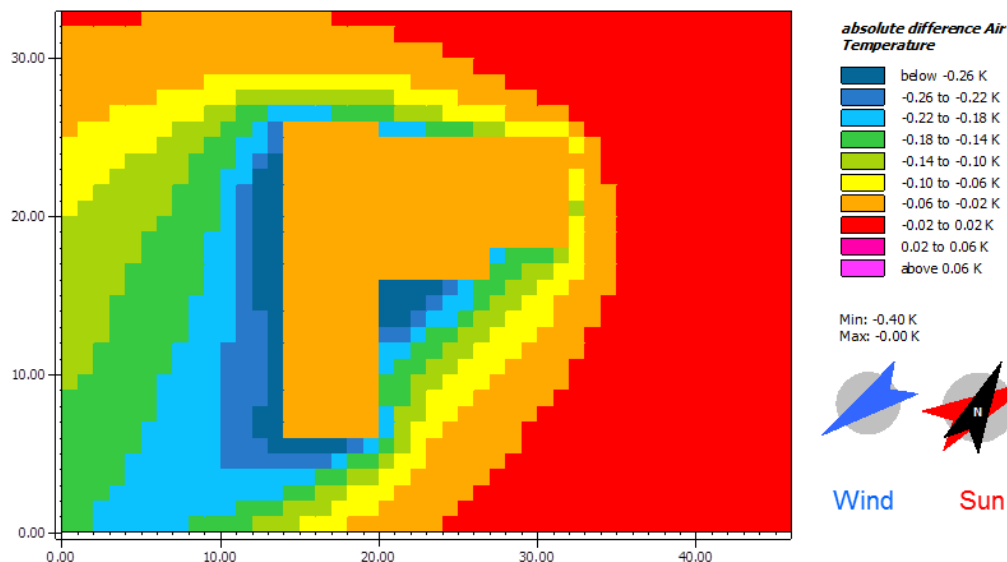


Abbildung 131: Veränderung der Lufttemperatur in K durch eine Fassadenbegrünung mit Moos, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr

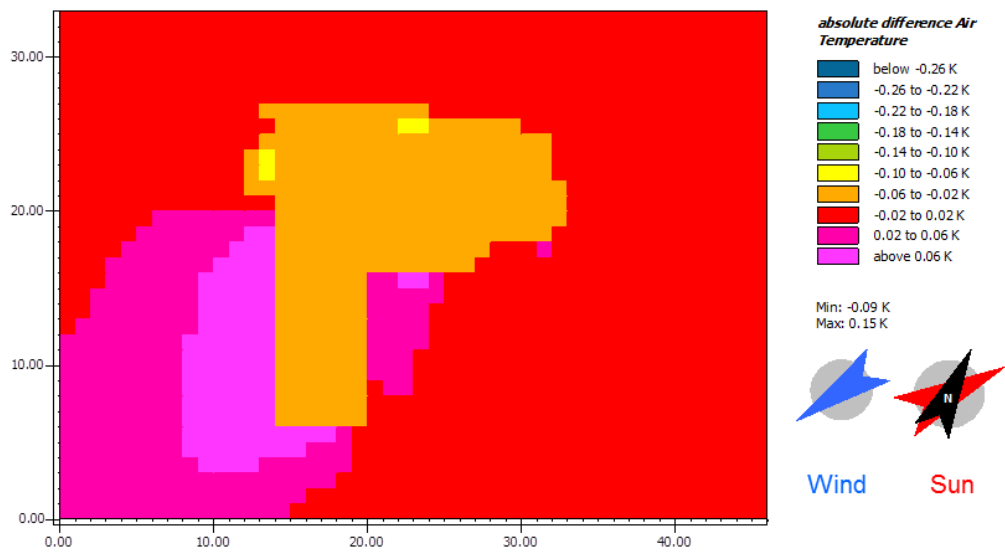


Abbildung 132: Veränderung der Lufttemperatur in K durch Fassadenbegrünung mit Efeu, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr

Die Moosfassade führt auf dem gesamten Grundstück zu einer Verringerung der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET). Die PET-Differenz zum Ausgangsszenario beträgt zwischen -0,01 K und -2,73 K. Der größte Effekt stellt sich auf den sonnenabgewandten Seiten in unmittelbarer Nähe zur Fassade ein (Abbildung 133). Im Gegensatz dazu ergibt sich bei der efeubewachsenen Fassade sogar eine Verschlechterung der PET von bis zu 1,44 K (Abbildung 134). Diese Werte sind vergleichbar mit den Ergebnissen anderer Studien, die aufzeigen, dass der Kühleffekt von Efeu (*Hedera Helix*) infolge der Pflanzenparameter vernachlässigbar ist. Der Effekt von Efeu ist insbesondere von der Dicke des Bewuchs und der Abdeckung abhängig. Beispielsweise erreicht Wilder Wein (*Parthenicissus tricuspidata*) eine Bewuchsdicke an der Fassade von 20 cm bei einem höheren Blattflächenindex, wodurch sich leicht signifikante Effekte der Lufttemperaturreduktion zeigen. Um einen Effekt auf die Außenlufttemperatur zu erzielen, ist ein Blattflächenindex von 3 oder höher anzustreben und Blätter, die parallel zur Wandoberfläche wachsen (Pérez et al. 2014).

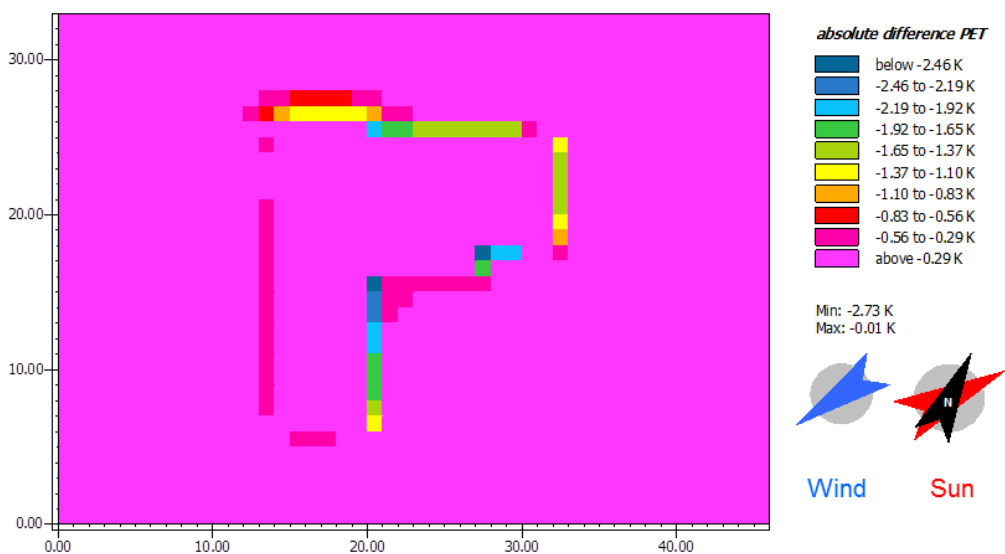


Abbildung 133: Veränderung PET in °C durch Moosbewuchs der Fassade, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr



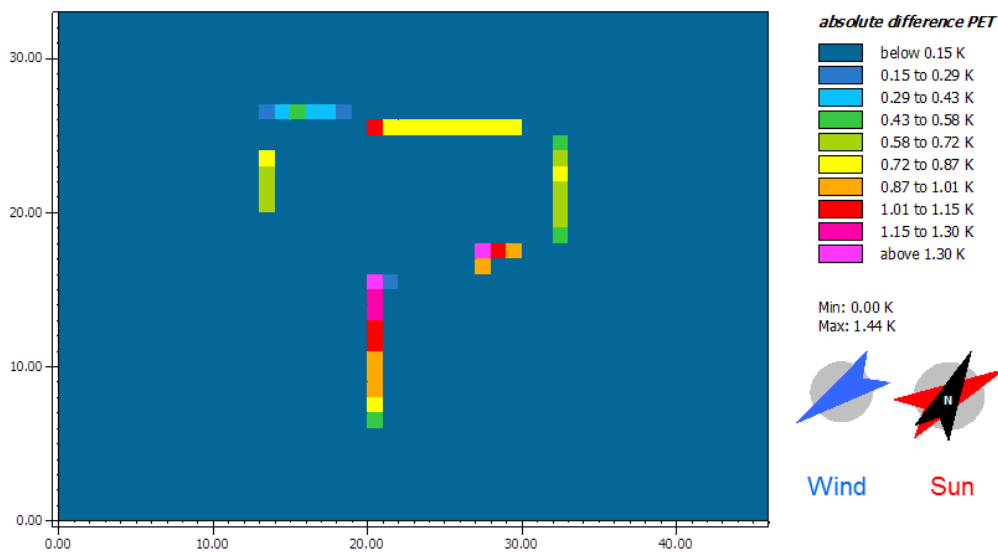


Abbildung 134: Veränderung PET in °C durch Efeubewuchs der Fassade, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr

#### 9.4.4. Begrünung der Außenanlagen

Abbildung 135 zeigt die Musterliegenschaft inklusive der simulierten Begrünung der Außenanlagen. Entlang der Grundstücksgrenzen wurden Hecken aus Hainbuche und Gemeiner Hasel vorgesehen. Im nord-westlichen Eck des Grundstücks wurde eine Winterlinde und in den restlichen Bereichen zehn Apfelbäume angenommen. Die Kreise in Abbildung 135 (Aufsicht) verdeutlichen den Radius der Baumkrone bzw. der Hecke. Es wurden verschiedene Iterationen bezüglich der Position und Anzahl an Pflanzen durchgeführt.

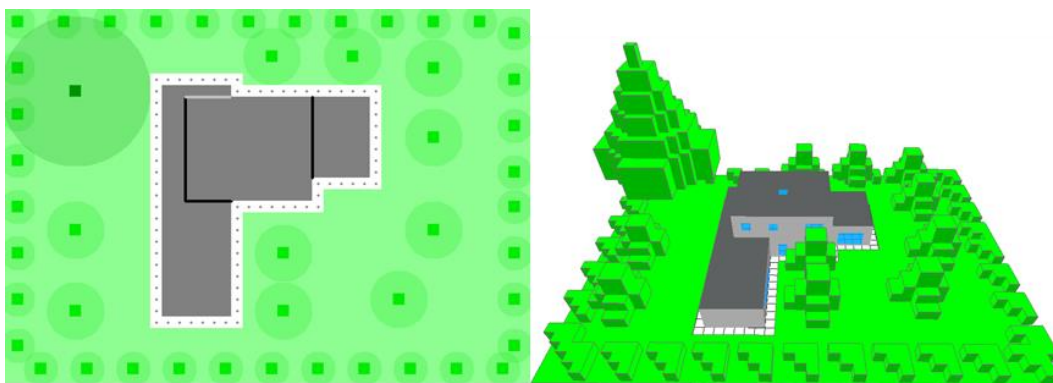


Abbildung 135: Begrünung der Außenanlagen mit Bäumen und Hecken, links: Aufsicht, rechts: 3D-Darstellung.

Der Kühleffekt auf die Lufttemperatur durch die Verschattung und Verdunstung infolge der Bepflanzung der Außenanlagen ist in Abbildung 136 insbesondere im Bereich der Winterlinde, des größten Baums auf dem Grundstück, deutlich zu erkennen. Hier können Lufttemperaturreduktionen von bis zu 1,24 K erreicht werden. Der Kühleffekt der kleineren Apfelbäume ist wesentlich weniger stark ausgeprägt. Im Bereich der Hecken im Nordwesten und Westen des Grundstücks kommt es zu einem geringfügigen Temperaturanstieg. Aus dieser Richtung weht zum Betrachtungszeitpunkt der Wind. Die Umgebung der Musterliegenschaft ist im Modell als Freifläche ohne zusätzliche Begrünung definiert, sodass der Wind wärmere Luft zur Musterliegenschaft führt und erst an der Grundstücksgrenze ein Kühleffekt durch die Begrünung einsetzen kann. Die wärmere Luft aus Nordnordost staut sich zunächst im Bereich der Hecken, da durch diese die Windgeschwindigkeit reduziert wird. In Windrichtung macht sich der Kühleffekt der Begrünung immer deutlicher bemerkbar.

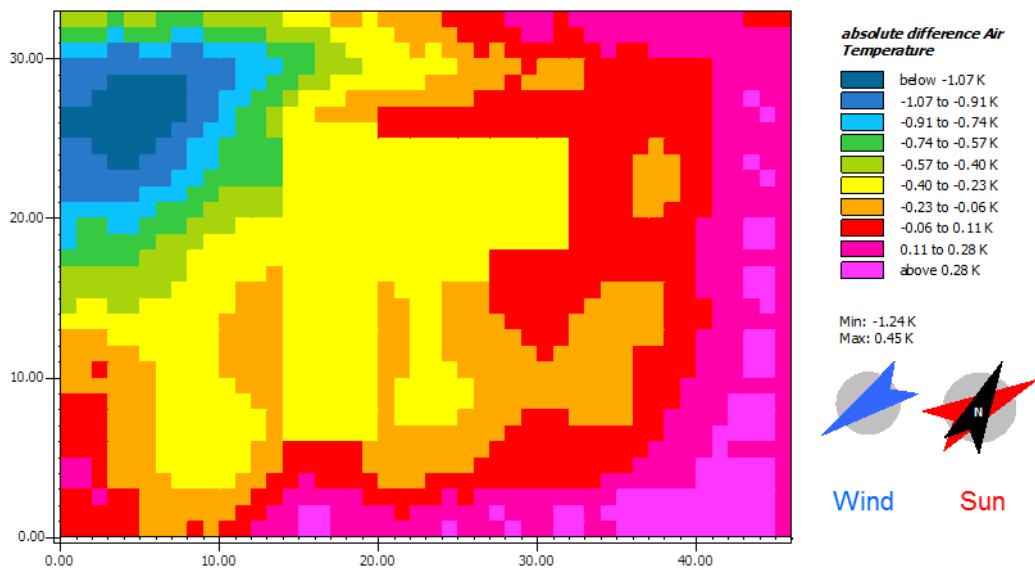


Abbildung 136: Veränderung der Lufttemperatur in K durch die Begrünung der Außenanlagen, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr

Eine starke Reduktion der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) kann insbesondere unter den Bäumen festgestellt werden (s. Abbildung 137). Der stärkste Effekt ergibt sich erwartungsgemäß unter der großen Winterlinde, mit einer PET-Reduktion von bis zu -8,22 K, im Vergleich zum Ausgangsszenario mit ausschließlich Rasen. Einen wesentlichen Beitrag zur PET-Reduktion liefert der Verschattungseffekt durch die Baumkrone. Doch selbst mit dieser starken PET-Reduktion werden unter der Winterlinde noch Absolutwerte der PET von 40 °C bis 45 °C erreicht. Die kleineren Apfelbäume führen ebenfalls zu einer signifikanten Abnahme der physiologisch äquivalenten Temperatur. Es werden Werte zwischen 42 °C bis 43 °C erreicht, anstelle von 48 °C bis 49 °C im Ausgangsszenario. Trotz der starken PET-Reduktion würden sich Personen auf dem Grundstück in einem Zustand des starken oder extremen Hitzestress befinden.

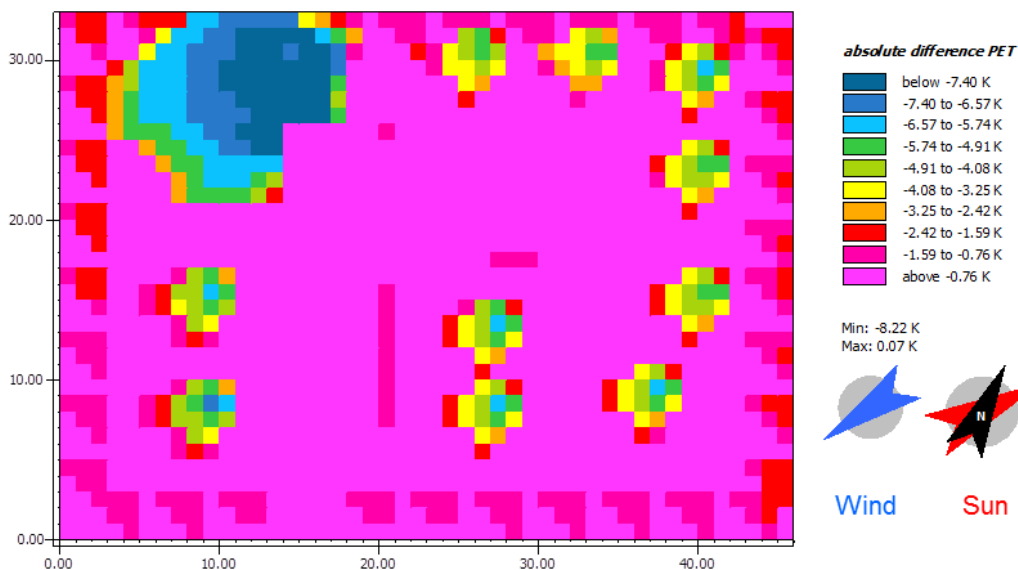


Abbildung 137: Veränderung PET in °C durch die Begrünung der Außenanlagen, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr

## 9.5. Siedlungsräume

Die Simulationen an der Musterliegenschaft verdeutlichen, dass die Begrünung der Außenanlagen den größten Effekt auf die Reduktion der Lufttemperatur und der physiologisch äquivalente Temperatur hat. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass kleinräumige Begrünungen auf nur einem Grundstück und die Betrachtung nur eines Grundstücks nicht den gesamten erzielbaren Effekt durch Begrünung darstellen können. Insbesondere in Abbildung 136 zeigt sich, dass sich der Effekt der Winterlinde auch auf benachbarte Grundstücke auswirken würde. Wird nur die Musterliegenschaft betrachtet, dann kann schon eine etwas höhere Windgeschwindigkeit dazu führen, dass die kühlere Luft infolge der Verdunstung der Pflanzen über die Grundstücksgrenze fortgeführt wird. Auf der Musterliegenschaft macht sich in diesem Fall überhaupt nicht die volle Kühlwirkung bemerkbar. Aus diesem Grund wurde im Folgenden der Betrachtungsrahmen auf Siedlungsräume erweitert.

Bei der Auswahl der zu simulierenden Siedlungsräume wurde Wert darauf gelegt für Deutschland repräsentative Quartiersstrukturen abzubilden. Das Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau beschreibt neun typische Siedlungstypen für Deutschland (Roth 1980). Sievers/Früh (2012) haben auf dieser Grundlage stadtklimatische Sensitivitätsstudien mit dem dreidimensionalen Mikroklimamodel MUKLIMO\_3 durchgeführt. Zur Vereinfachung sind die Siedlungstypen als prozentualer Anteil homogener Oberflächen angegeben, wodurch es leicht möglich wird vereinfachte Anpassungsmaßnahmen und deren Auswirkungen in das Modell zu integrieren. Die Ergebnisse der Studien können über das interaktive „Informationsportal Klimaanpassung in Städten“ (INKAS) auf den Internetseiten des DWD eingesehen werden (DWD 23. 10. 2019).

Für die vorliegende Untersuchung wurden zwei Siedlungstypen ausgewählt, in denen das Mustergebäude auftreten könnte:

- Dorfkern,
- Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung.

Die prozentuale Aufteilung der Gesamtfläche des Siedlungstyps auf die Teilflächen Gebäude, versiegelte Fläche, Vegetation und unbewachsener Boden kann der Abbildung 138 und der Abbildung 139 entnommen werden.

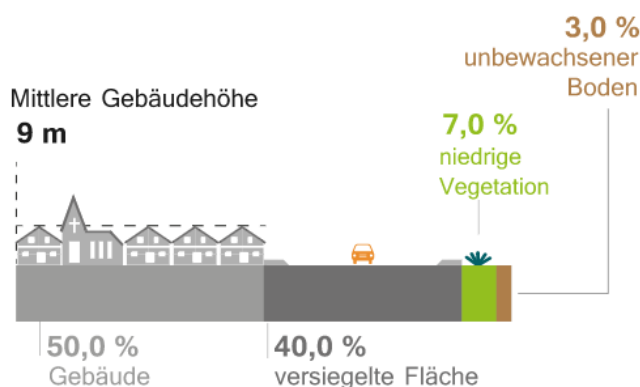


Abbildung 138: Siedlungstyp Dorfkern, prozentualer Flächenanteil (DWD 23. 10. 2019)

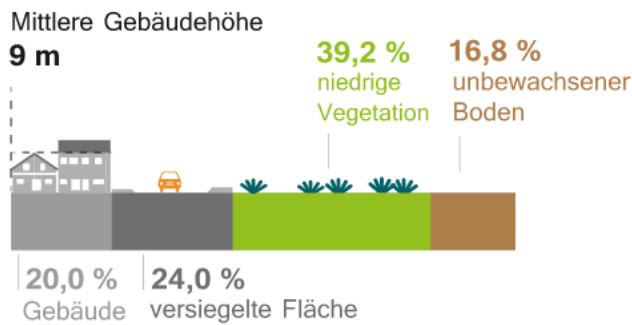


Abbildung 139: Siedlungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, prozentualer Flächenanteil (DWD 23. 10. 2019)

Die Siedlungstypen Dorfkern sowie Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung werden in ENVI-MET mit einer Grundfläche von 112 m x 118 m modelliert.

### 9.5.1. Dorfkern

Der Siedlungstyp Dorfkern wird durch eine enge, dichte Bebauung und zahlreiche versiegelte Flächen charakterisiert. Abbildung 140 zeigt die Aufsicht auf das zugehörige ENVI-MET-Modell. Die Gebäude sind mittelgrau dargestellt, die versiegelten Flächen schwarz und hellgrau. Die Grundfläche jedes Gebäudes ist 16 m x 20 m, mit Ausnahme der Musterliegenschaft, die im Zentrum des Siedlungsgebiets zu erkennen ist. Die Gebäudehöhe wurde entsprechend der Höhe der Musterliegenschaft auf 6 m festgelegt. Die Ränder des Siedlungsgebiets werden durch Straßenflächen aus Asphalt eingefasst. Der zentrale Erschließungsweg besteht aus einer hellen Betonoberfläche. Da in dieser Siedlungsstruktur keine privaten Gärten vorkommen und die Grünfläche einen sehr geringen Anteil ausmacht, wurden bei den untersuchten Begrünungsszenarien keine Bäume berücksichtigt. Für diesen Siedlungstyp wurden zwei Begrünungsszenarien untersucht:

- Begrünungsszenario 1: Moosdach und Efeufassade,
- Begrünungsszenario 2: Extensive Dachbegrünung und Moosfassade.

Die Ergebnisse der Begrünungsszenarien werden jeweils mit dem Ausgangsszenario ohne Dach- und Fassadenbegrünung verglichen. Die Untersuchungsebene ist zu 1,5 m über Geländeoberkante definiert.

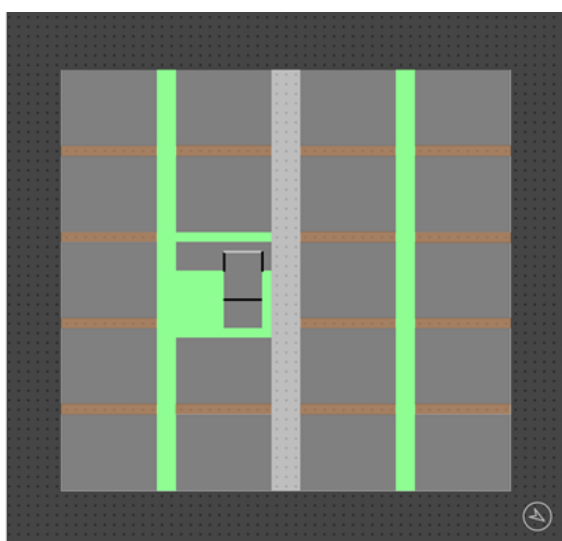


Abbildung 140: Darstellung des Siedlungstyps Dorfkern als ENVI-MET-Modell (Aufsicht)

### 9.5.2. Ausgangsszenario

In den folgenden Abbildungen sind der Nordpfeil, die Position der Sonne und die Windrichtung zu beachten. In Abbildung 141 wird der Effekt der gegenseitigen Verschattung deutlich. Zwischen den Gebäuden werden relativ niedrige Lufttemperaturen von etwas über 35 °C erreicht, während über den unverschatteten Asphaltflächen Lufttemperaturen von über 37 °C zu verzeichnen sind. Der von Norden wehende Wind trägt die heiße Luft über den Asphaltflächen teilweise in die Häuserschluchten. Mit zunehmendem Durchströmungsweg nimmt die Lufttemperatur infolge der Verschattung ab, sodass die niedrigsten Temperaturen im südlichen Bereich zwischen den Gebäuden auftreten. Die physiologisch äquivalente Temperatur bewegt sich zwischen 37,65 °C im verschatteten Bereich zwischen den Gebäuden und 51,08 °C über den offenen Asphaltflächen. Die thermische Belastung befindet sich folglich im Bereich zwischen starkem Hitzestress und extremem Hitzestress (s. Abbildung 142)

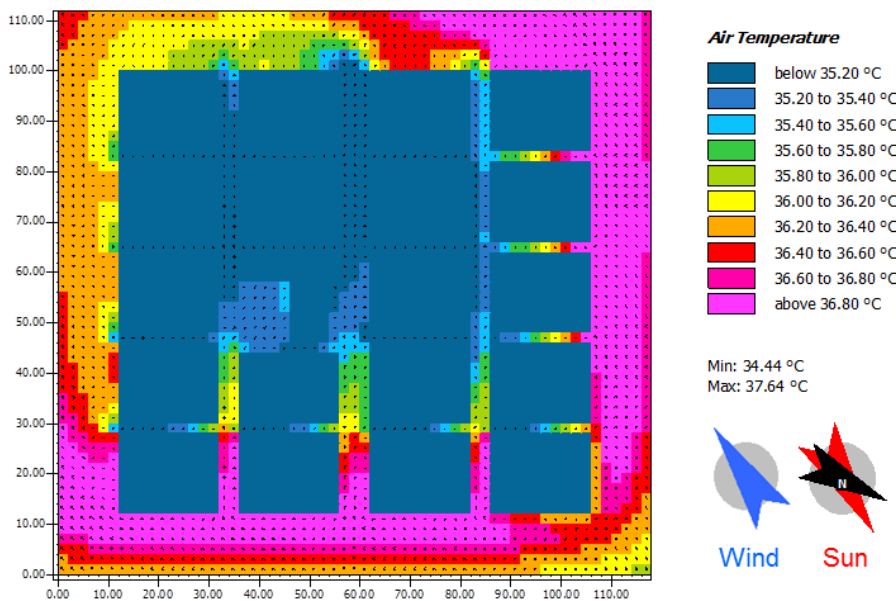


Abbildung 141: Dorfkern, Ausgangsszenario, Potsdam 2010 Sommer, Lufttemperatur in °C um 14.00 Uhr

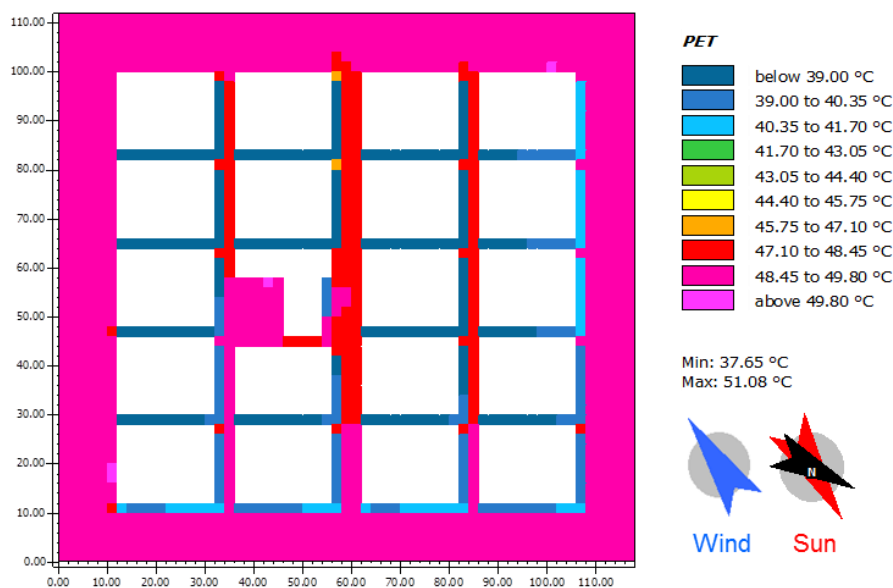


Abbildung 142: Dorfkern, Ausgangsszenario, Potsdam 2010 Sommer, PET in °C um 14.00 Uhr

### 9.5.3. Begrünungsszenario 1: Moosdach und Efeufassade

Die Dachbegrünung mit Moos und die Fassadenbegrünung mit Efeu führen zu einer Lufttemperaturreduktion von bis zu 1,15 K. Der Effekt ist wegen der Windanströmung im Süden des Betrachtungsgebiets wiederum größer als im Norden (Abbildung 143). Die kühle Luft strömt infolge des Winds nach Süden aus dem bebauten Gebiet aus. Bei der physiologisch äquivalenten Temperatur zeigt sich wieder derselbe Effekt wie schon bei der Betrachtung der Fassadenbegrünung durch Efeu auf der Musterliegenschaft. Die PET-Werte steigen in den Bereichen zwischen den Gebäuden geringfügig an (+0,1 K bis +0,99 K). Dies ist im Wesentlichen auf die reduzierte Windgeschwindigkeit zwischen den Gebäuden durch die Fassadenbegrünung zurückzuführen (Abbildung 144).

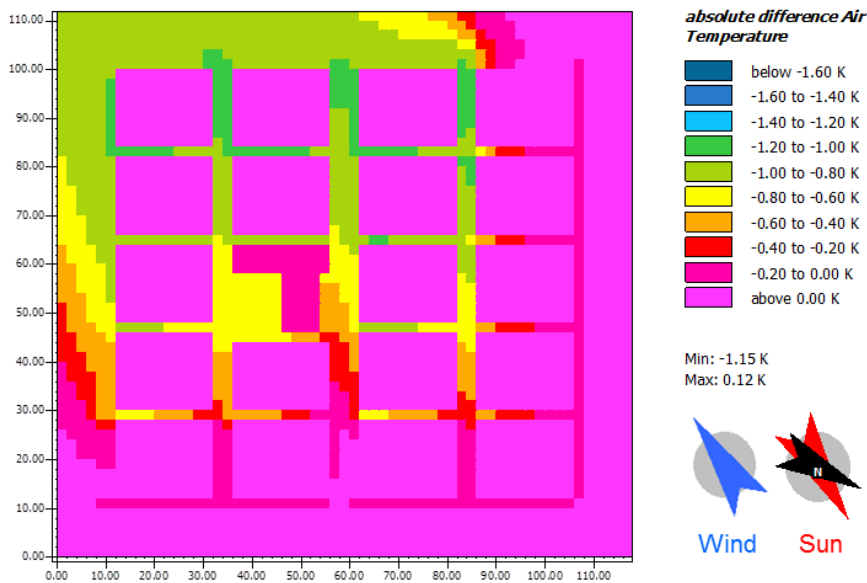


Abbildung 143: Dorf kern, Moosdach und Efeufassade, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr

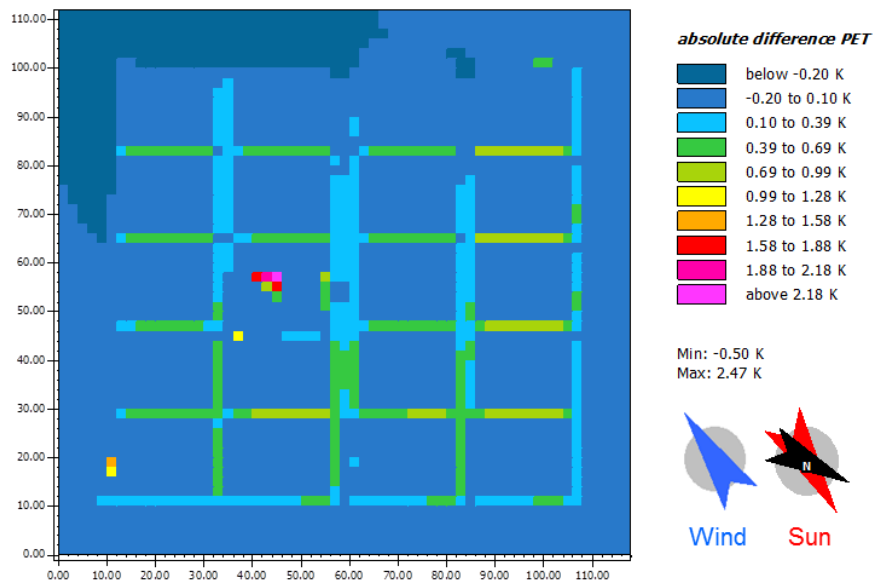


Abbildung 144: Dorf kern, Moosdach und Efeufassade, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET in K um 14.00 Uhr

### 9.5.4. Begrünungsszenario 2: Extensive Dachbegrünung und Moosfassade

Die extensive Dachbegrünung in Kombination mit der Moosfassade führen zu einer maximalen Lufttemperaturreduktion von 1,79 K (Abbildung 145). Die physiologisch äquivalente Temperatur (Abbildung 146) kann in der Umgebung der Bebauung durchgehend abgesenkt werden, mit einer maximalen Reduktion um 3,30 K. Dadurch fallen alle verschatteten Bereiche zwischen den Gebäuden in den Bereich des starken Hitzestress mit PET-Werten zwischen 37,65 °C und 40,95 °C. Folglich ist das Begrünungsszenario 2 mit extensiver Dachbegrünung und Moosfassade hinsichtlich des Außenraumkomforts besser geeignet.

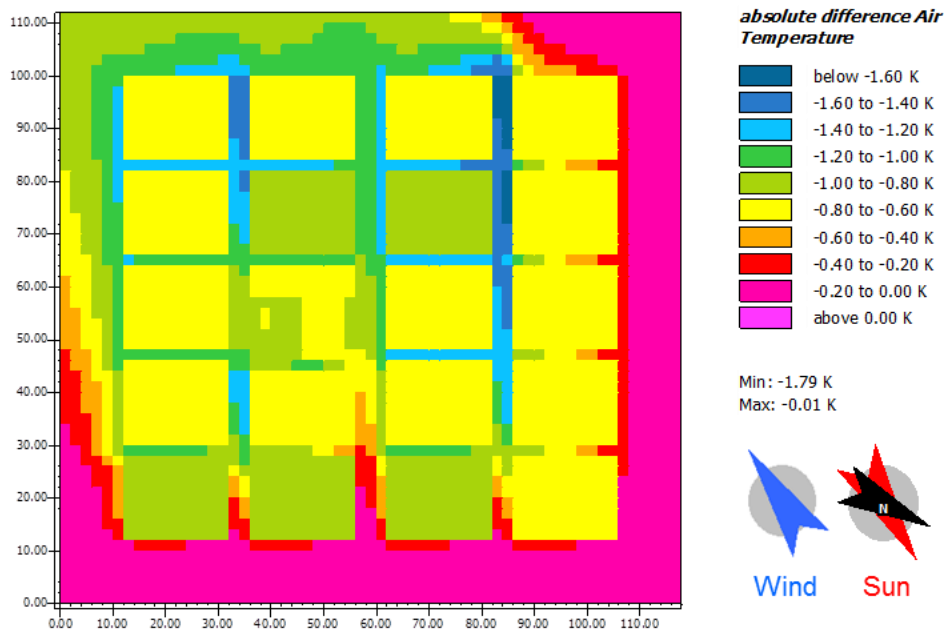


Abbildung 145: Dorfkern, extensive Dachbegrünung und Moosfassade, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr

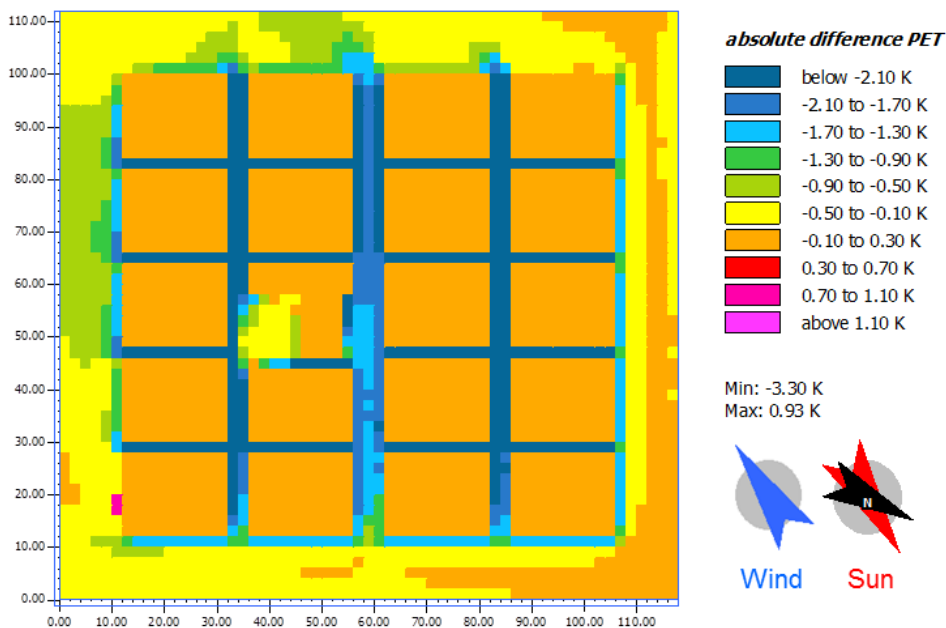


Abbildung 146: Dorfkern, extensive Dachbegrünung und Moosfassade, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung PET in K um 14.00 Uhr

### 9.5.5. Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung

Der Siedlungsstrukturtyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung zeichnet sich durch deutlich größere Freiflächen zwischen den Gebäuden aus (Abbildung 147). Jedes Standardgebäude weist eine Grundfläche von 14 m x 12 m auf. Die Gebäudehöhen werden entsprechend der Höhe der Musterliegenschaft zu 6 m definiert. Jedes Grundstück weist eine Gartenfläche von 240 m<sup>2</sup> auf. Die großen Gartenflächen ermöglichen eine Begrünung mit Bäumen und Büschen. Die folgenden drei Begrünungsszenarien werden für den Siedlungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung untersucht:

- Begrünungsszenario 1: Bäume und Büsche,
- Begrünungsszenario 2: Bäume, Büsche + extensive Dachbegrünung,
- Begrünungsszenario 3: Bäume, Büsche + extensive Dachbegrünung + Moosfassade.

Die Begrünungsszenarien wurden so gewählt, dass mit der üblichsten Begrünungsform, nämlich der Begrünung von Außenanlagen begonnen wird. Anschließend wird eine Dachbegrünung hinzugefügt, was aktuell durchaus auch zur gängigen Praxis gezählt werden darf. Als letztes wird eine Fassadenbegrünung appliziert, womit das gesamte Gebäude begrünt ist. Die Fassadenbegrünung ist nach wie vor die außergewöhnlichste Form der Gebäudebegrünung. Das Ausgangsszenario wird wiederum mit 10 cm hohem Gras als einziger Begrünung simuliert.

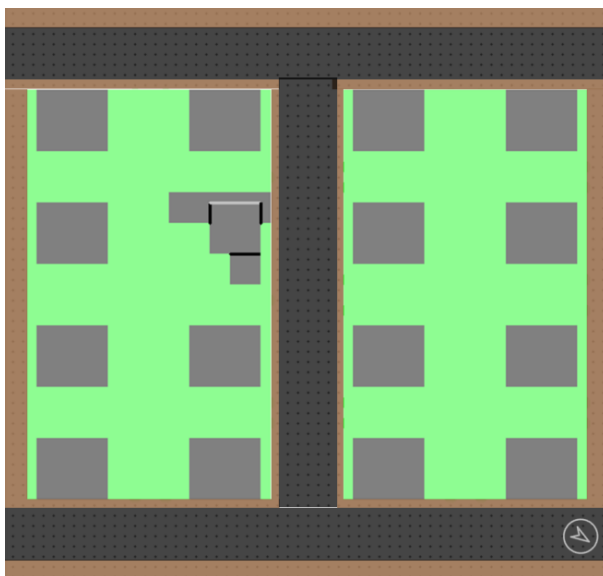


Abbildung 147: Darstellung des Siedlungstyps Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung als ENVI-MET-Modell (Aufsicht)

### 9.5.6. Ausgangsszenario

Im Vergleich zum Siedlungstyp Dorfkern sind die Lufttemperaturen in der Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung relativ niedrig (Abbildung 148). Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass weniger versiegelte Flächen im Nordosten des Siedlungsraumes vorhanden sind und damit weniger aufgeheizte Luft in den Siedlungskörper eingetragen wird. Im Gegensatz dazu ist die physiologisch äquivalente Temperatur höher als beim Siedlungstyp Dorfkern, da nur wenige Flächen durch die Bebauung verschattet werden. Die thermische Belastung im Außenraum erreicht in nahezu allen Bereichen den extremen Hitzestress (PET > 41 °C) (Abbildung 149).



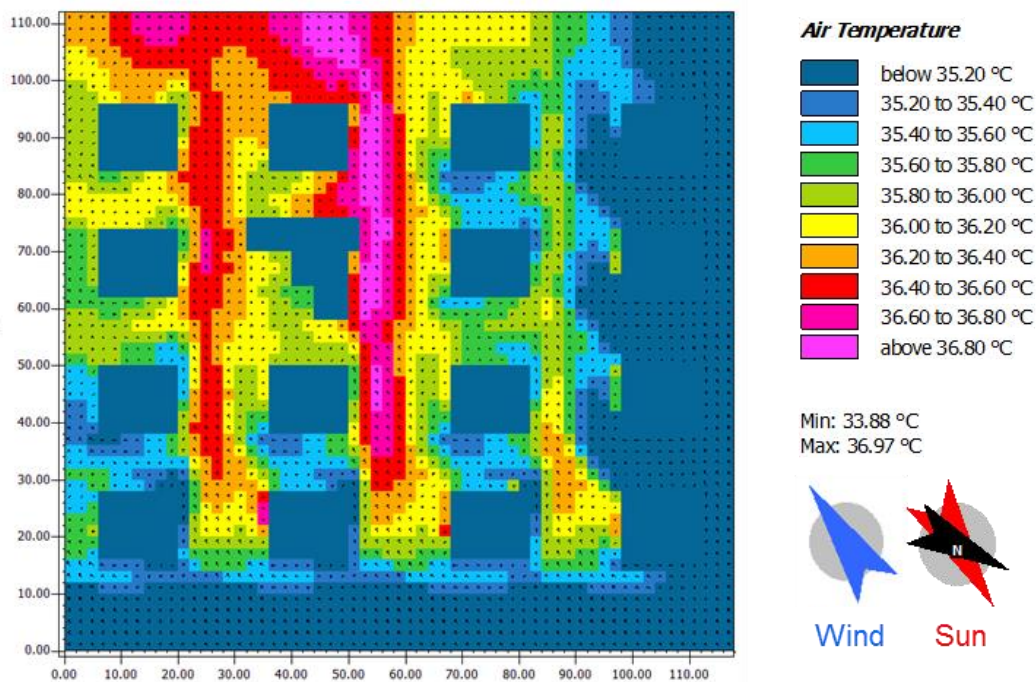


Abbildung 148: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Ausgangsszenario, Potsdam 2010 Sommer, Lufttemperatur in °C um 14.00 Uhr

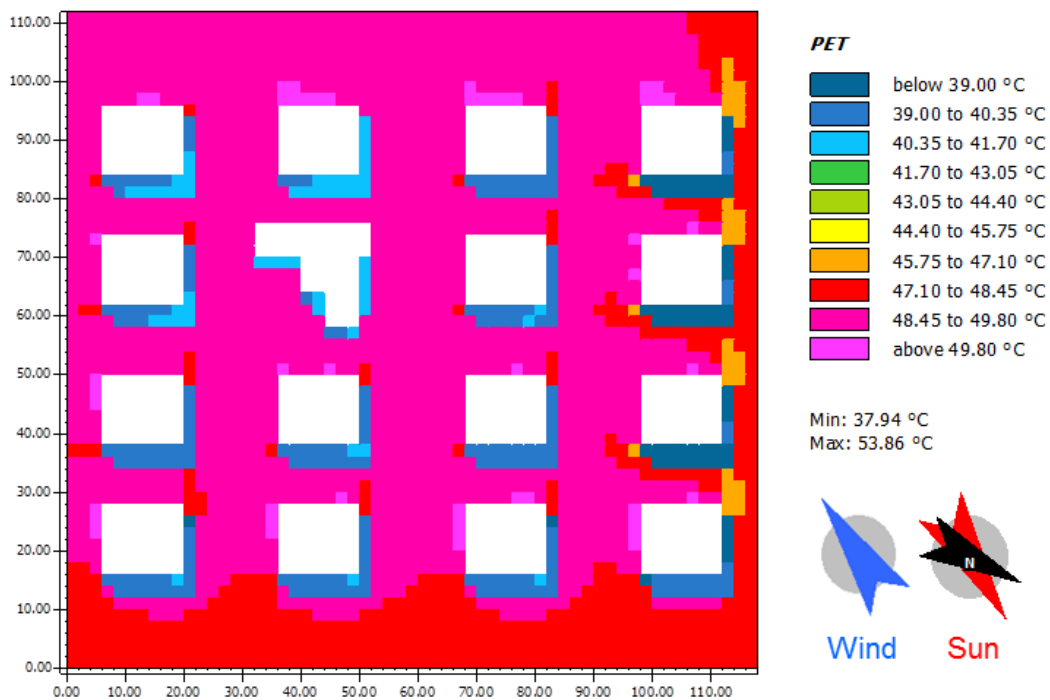


Abbildung 149: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Ausgangsszenario, Potsdam 2010 Sommer, PET in °C um 14.00 Uhr

### 9.5.7. Begrünungsszenario 1: Bäume und Büsche

Entsprechend der verfügbaren Fläche werden die Bäume und Hecken in realistischen Abständen zueinander angeordnet, ohne dass die Luftdurchströmung vollständig blockiert wird. Die Winterlinden werden in den Mittelpunkten der begrünten Bereiche vorgesehen. Die Hainbuchen und der gewöhnliche Hasel werden als Hecken entlang der Straßen und unbewachsenen Flächen eingesetzt. Die restlichen Flächen zwischen den Gebäuden werden mit Apfelbäumen versehen (Abbildung 150).

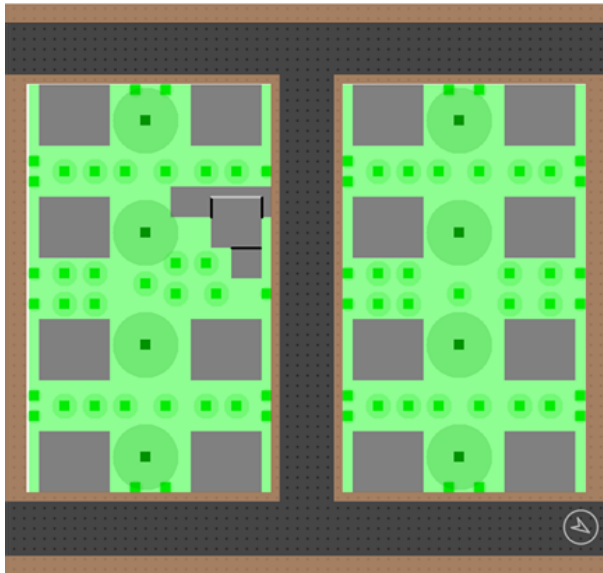


Abbildung 150: Anordnung der Winterlinden, Apfelbäume und Hainbuchen-/Haselhecken

In den verschatteten Bereichen um die Bäume kann eine lokale Reduktion der Lufttemperatur von bis zu  $1,82\text{ }^{\circ}\text{C}$  erzielt werden. Durch den Siedlungsbereich verläuft eine Straße. Das Gebiet nördlich der Straße weist eine stärkere Abkühlung auf, als das Gebiet südlich davon. Dies ist auf die starke Erwärmung der Luft über der Straße und deren Einströmung in das südliche Gebiet infolge des Windes zurückzuführen (Abbildung 151).

Noch wesentlich ausgeprägter ist die Reduktion der physiologisch äquivalenten Temperatur. Unter den großen Winterlinden kann eine Reduktion um bis zu  $11,06\text{ K}$  verzeichnet werden. Im Bereich der kleineren Apfelbäume kann immerhin eine Reduktion zwischen  $3\text{ K}$  und  $11\text{ K}$  erreicht werden (Abbildung 152). Die aufgezeigte Erhöhung der PET ist für Innenraumbereiche ausgewiesen und dementsprechend nicht relevant.

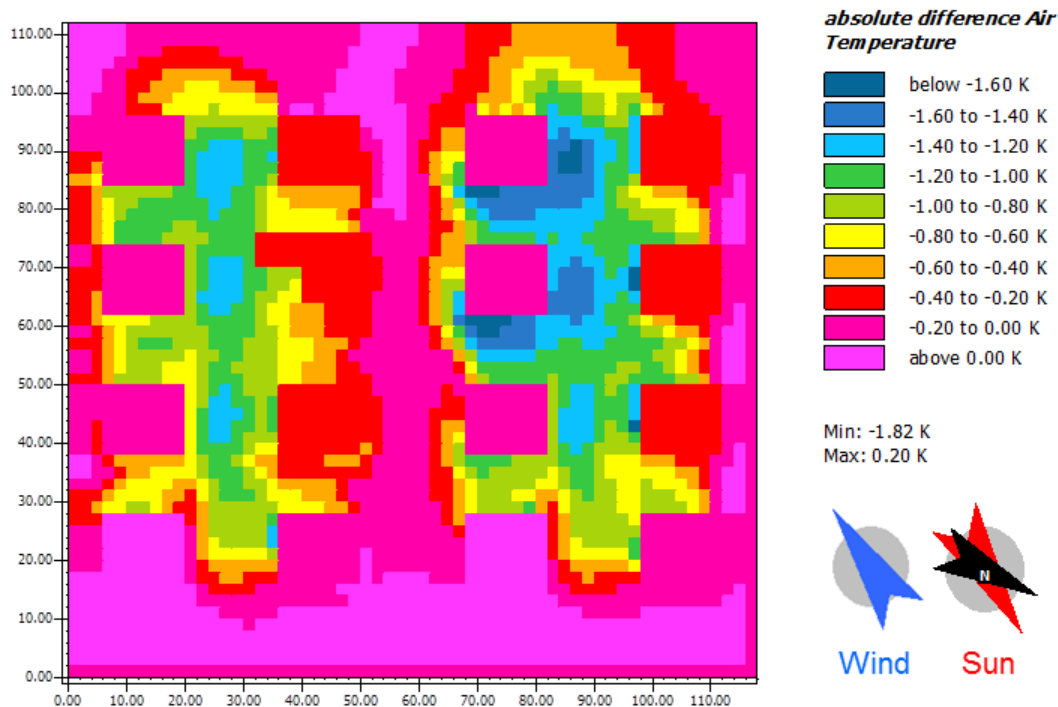


Abbildung 151: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 1, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr

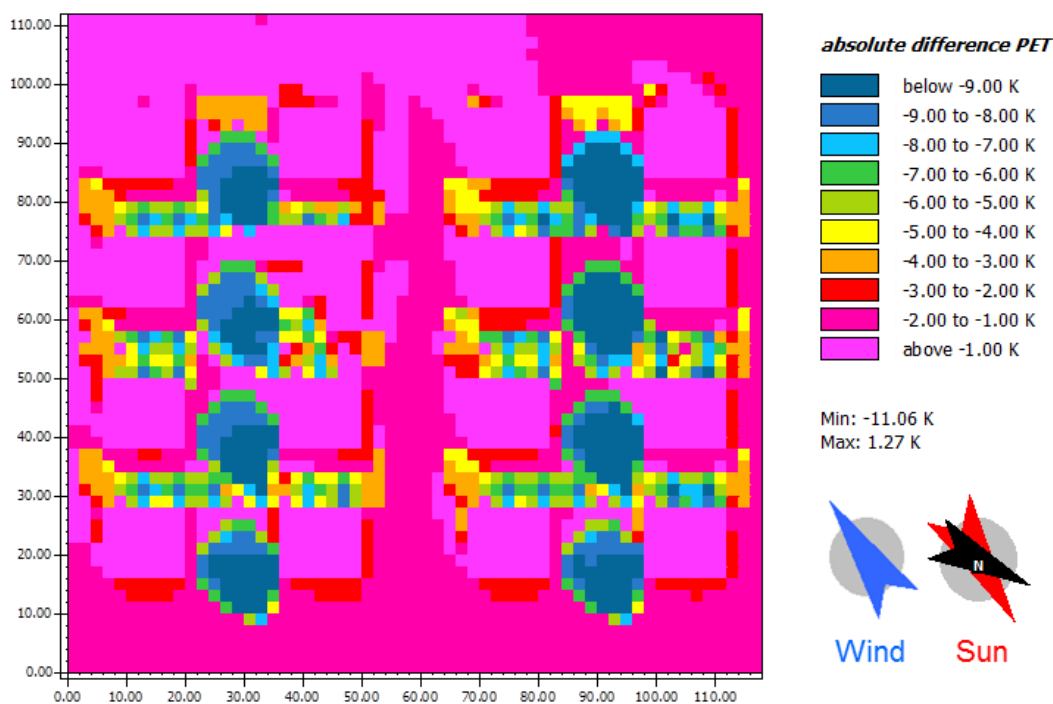


Abbildung 152: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 1, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET in K um 14.00 Uhr

### 9.5.8. Begrünungsszenario 2: Bäume, Büsche + extensive Dachbegrünung

Durch die zusätzliche Dachbegrünung erfährt die Lufttemperatur in 1,5 m Höhe über Geländeoberkante nochmals eine geringfügige Abkühlung (Abbildung 153). Im Vergleich mit Abbildung 151 erkennt man wie sich die dunkelblauen Bereiche im nördlichen Gebiet ausdehnen und im südlichen Siedlungsbereich erstmals Bereiche mit einer Lufttemperaturabsenkung über 1,60 K auftreten. Die physiologisch äquivalente Temperatur kann durch die Dachbegrünung nur in sehr geringem Maße abgesenkt werden. Die Veränderungen sind in der verwendeten Kartendarstellung kaum zu erkennen, weshalb auf deren Abdruck verzichtet wird.

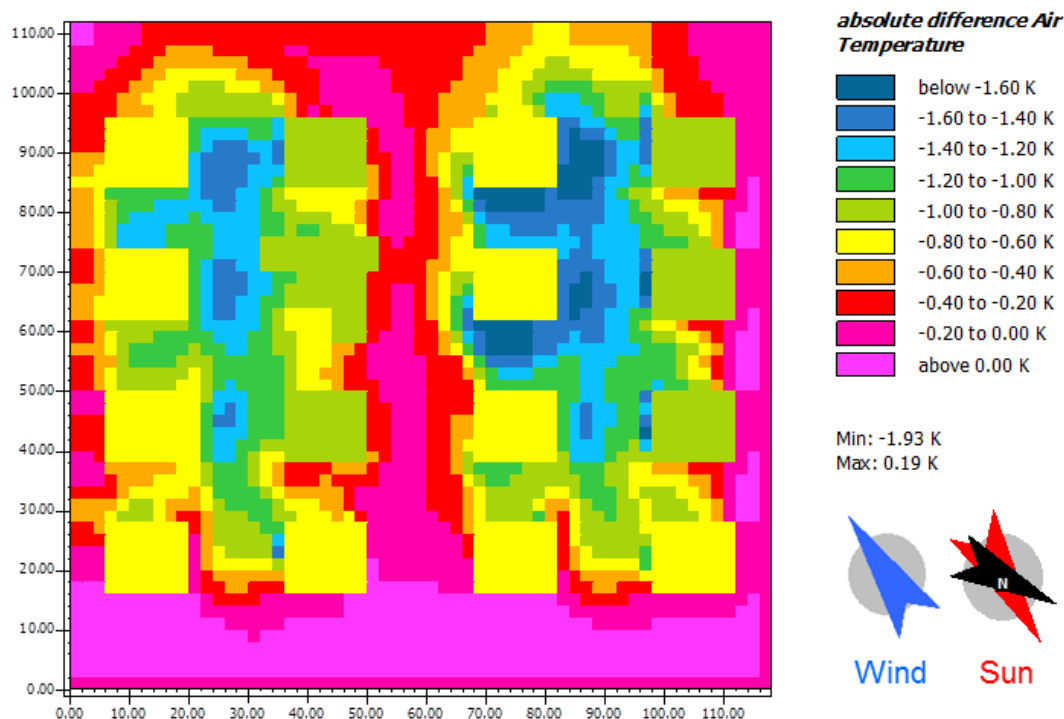


Abbildung 153: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 2, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr

### 9.5.9. Begrünungsszenario 3: Bäume, Büsche + extensive Dachbegrünung + Moosfassade

Im Vergleich zum Ausgangsszenario kann durch das Begrünungsszenario 3 eine maximale Lufttemperaturreduktion von 2,39 K erreicht werden (Abbildung 154). Im Vergleich zur Abbildung 153 weiten sich die Bereiche mit einer Lufttemperaturreduktion von über 1,60 °C deutlich aus und wachsen zusammen. Sogar die Lufttemperatur über der durch das Siedlungsgebiet verlaufenden Straße reduziert sich deutlich. Der Punkt mit der geringsten Lufttemperatur erreicht einen Wert von 32,87 °C mit circa 80 % des Gebiets unterhalb von 35 °C.

Die Reduktion der physiologisch äquivalenten Temperatur in Abbildung 155 ist ebenfalls beachtlich mit einem Maximum von - 12,17 K unterhalb der Bäume im Vergleich zum Ausgangsszenario mit Gras. Im Vergleich mit Abbildung 152 erkennt man, wie sich die Bereiche mit hoher PET-Reduktion ausdehnen. Dadurch werden PET-Werte zwischen 34,56 °C und 40,00 °C in Bereichen die durch Gebäude oder Winterlinden verschattet werden, erreicht. Dadurch kann die thermische Belastung in den Bereich des mäßigen Hitzestress abgesenkt werden. Unter den kleinen Apfelbäumen ist die Reduktion der physiologisch äquivalenten Temperatur weniger einheitlich, aber ebenfalls deutlich.

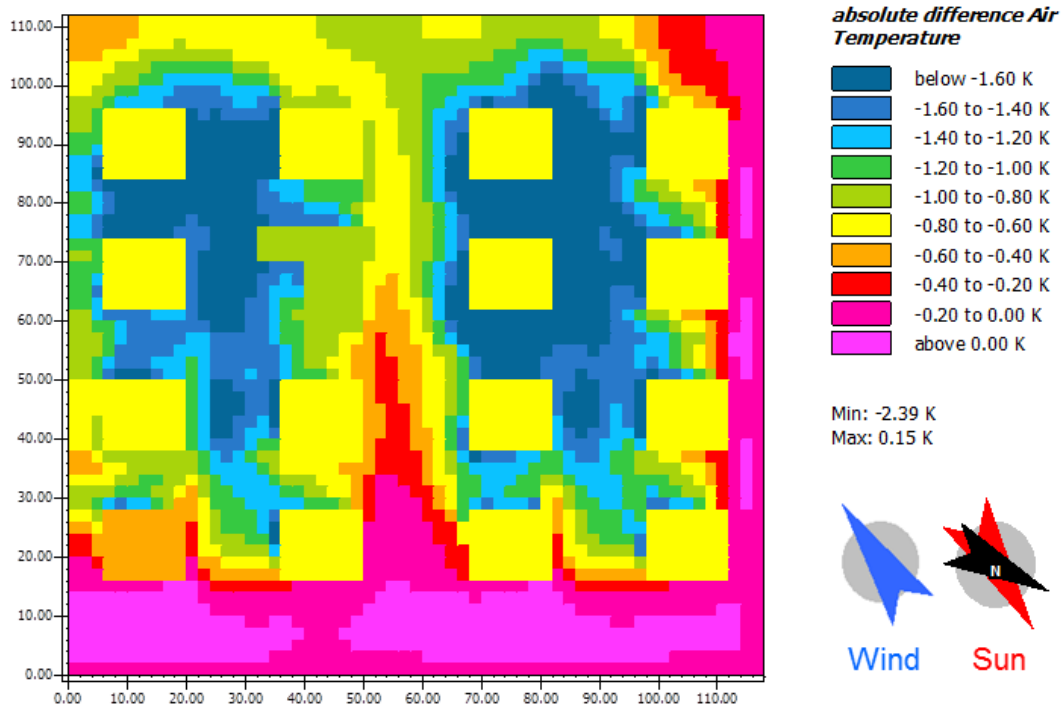


Abbildung 154: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 3, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr

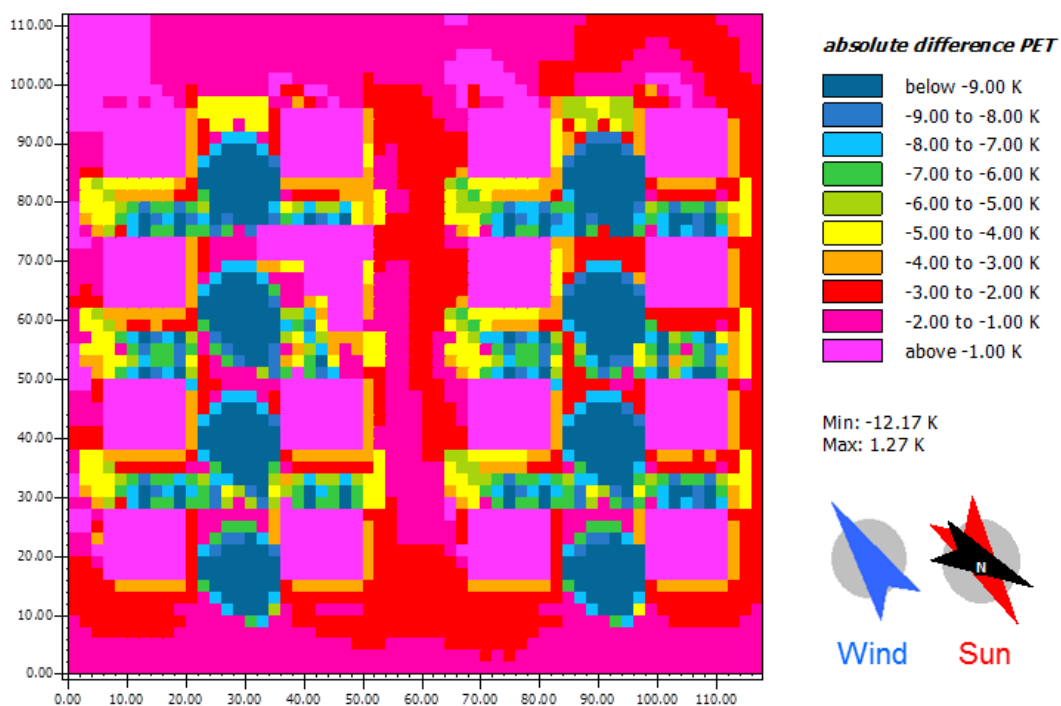


Abbildung 155: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 3, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET um 14.00 Uhr

### 9.5.10. Begrünungsszenario 1 mit Wasserflächen

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, wie sich eine blaue Infrastruktur auf das Mikroklima des Siedlungstyps Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung auswirken würde. Es wurde davon ausgegangen, dass auf jedem Grundstück ein Teich angeordnet wird. Die Wasseroberfläche bedeckt 10 % der zu jedem Grundstück gehörigen Gartenfläche, also 24 m<sup>2</sup>. Die Wasserflächen wurden zu 4 m x 6 m mit einer Wassertiefe von 2 m definiert. Es wurde davon ausgegangen, dass die Teiche zum Zeitpunkt der Betrachtung vollständig gefüllt sind. Infolge der relativ hohen Begrünungsdichte konnten die Teiche nur noch unter den Winterlinden angeordnet werden (Abbildung 156). Durch die Anordnung freier Wasserflächen kann die Lufttemperatur im Vergleich zum Begrünungsszenario 1 weiter abgesenkt werden (Abbildung 157). Die maximale zusätzliche Lufttemperaturreduktion in der Nähe der Wasserflächen beträgt über 0,30 K.

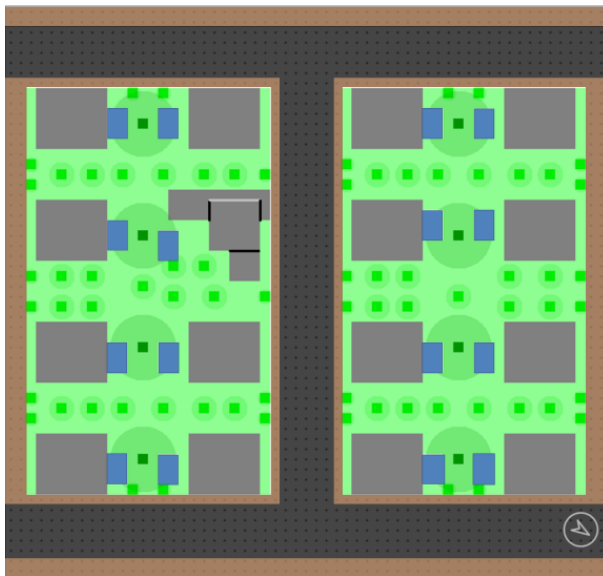


Abbildung 156: Begrünungsszenario 1 mit zusätzlichen Wasserflächen

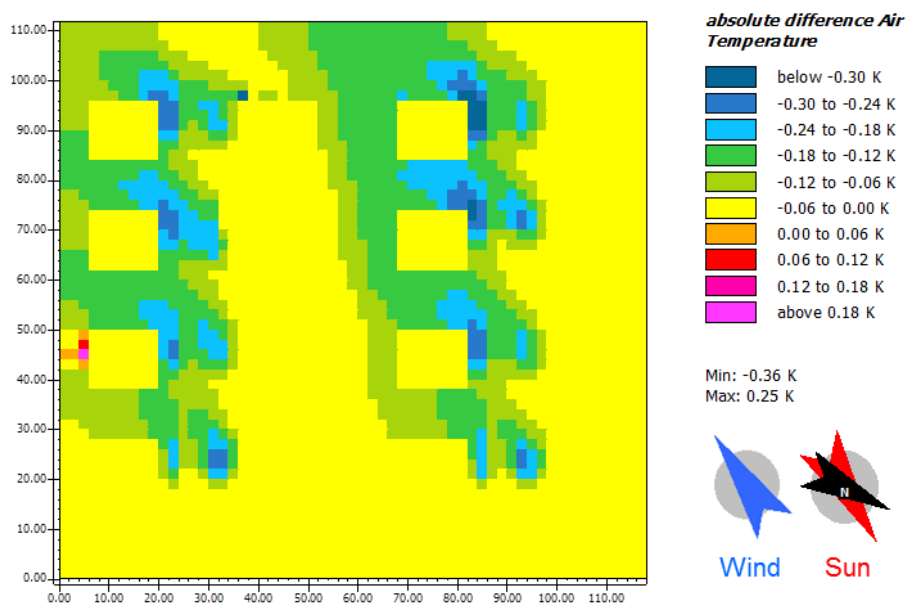


Abbildung 157: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 1 + Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit Begrünungsszenario 1

Des Weiteren wurden die Lufttemperaturen für die Zeitpunkte 17.00 Uhr und 22.00 Uhr untersucht, um die Wärmespeicherung durch den Wasserkörper zu berücksichtigen. In beiden Fällen werden allerdings in der Nähe der Teiche reduzierte Lufttemperaturen simuliert. Auch die physiologisch äquivalente Temperatur kann durch die zusätzlichen Wasserflächen um maximal 0,48 K weiter reduziert werden (Abbildung 158). Der Effekt erstreckt sich über weite Bereiche, die sich in Windrichtung gesehen hinter den Teichflächen befinden.

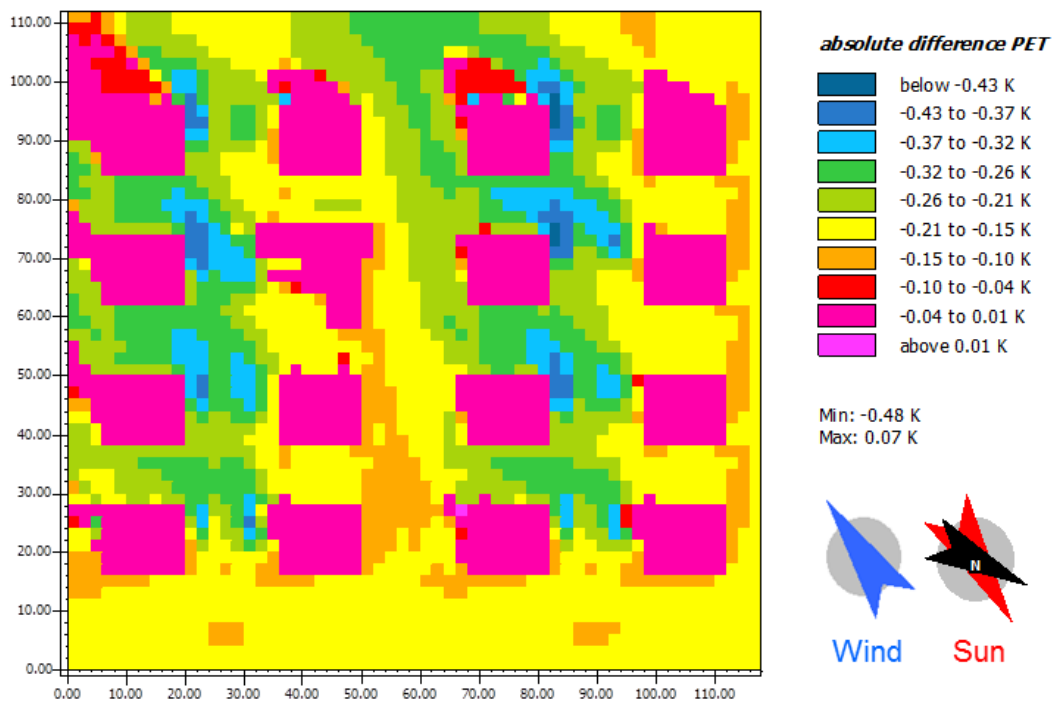


Abbildung 158: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 1 + Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit Begrünungsszenario 1

Es wird davon ausgegangen, dass verschattete Wasserflächen in ihrer Kühlwirkung weniger effizient sind, da durch die reduzierte Sonneneinstrahlung weniger Wasser verdunstet. Aus diesem Grund wurde im Folgenden ein Begrünungsszenario 1b definiert, mit reduzierter Anzahl an Apfelbäumen. Insgesamt werden 12 Apfelbäume entfernt, sodass sich ausreichende besonnte Freiflächen für die Anordnung der Teiche ergeben. Die Anordnung der Bäume und Büsche im Begrünungsszenario 1b kann Abbildung 159 entnommen werden. Das Begrünungsszenario 1b wurde mittels ENVI-MET mikroklimatisch simuliert, um als neue Vergleichsbasis zu dienen.

In den sich so ergebenden frei besonnten Flächen wird nun die gleiche Anzahl und Größe an Teichen eingeführt, wie zuvor (s. Abbildung 160). Abbildung 161 zeigt den Vergleich der Lufttemperatur zwischen dem Begrünungsszenario 1b mit reduzierter Anzahl an Apfelbäumen und dem Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen. Man erkennt deutlich, dass die über den Wasserflächen abgekühlte Luft durch den Wind nach Süden fortgetragen wird. Somit ergeben sich in Windrichtung hinter den Wasserflächen große Bereiche mit um 0,2 K bis 0,6 K reduzierten Lufttemperaturen. Durch die geringere Anzahl an Bäumen kann die kühle Luft relativ ungehindert in den Bereich der zentralen Straße strömen, so dass sich hier die maximalen Lufttemperaturreduktionen von bis zu 1,44 K einstellen. Man erkennt zudem den größeren Effekt der in der Mittelreihe nebeneinander angeordneten Teiche gegenüber den einzeln angeordneten Teichen (vergleiche Abbildung 160 und Abbildung 161). Hinter den zwei nebeneinander angeordneten Teichen ist die Lufttemperaturreduktion in Windrichtung größer, als bei den einzeln angeordneten Teichflächen.

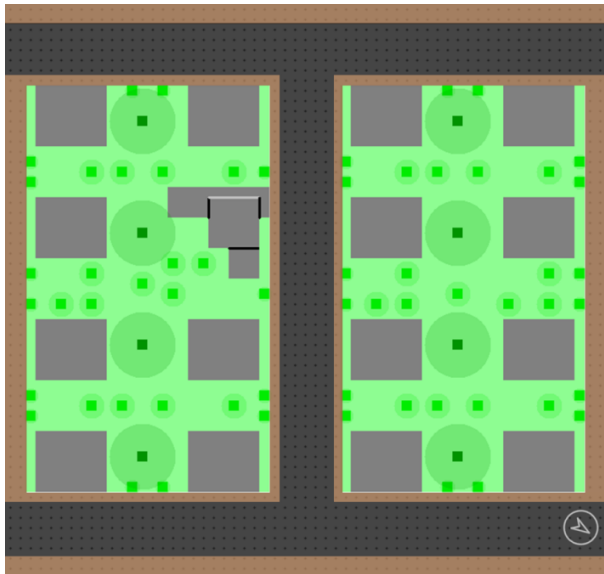


Abbildung 159: Begrünungsszenario 1b mit reduzierter Anzahl an Apfelbäumen

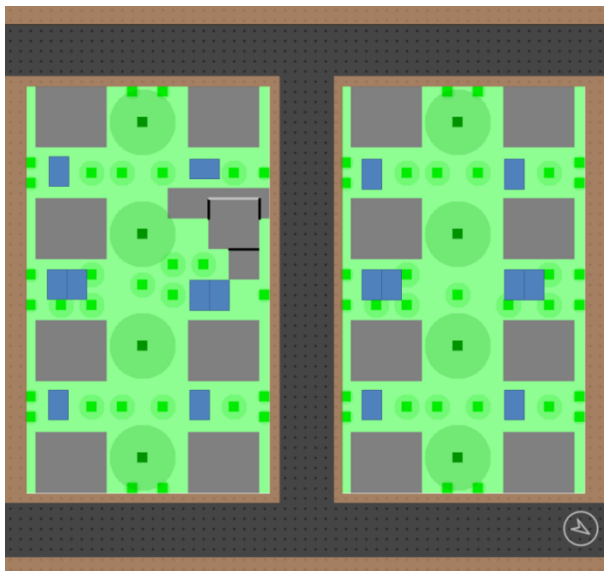


Abbildung 160: Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen

Abbildung 162 zeigt den Vergleich der Lufttemperatur zwischen dem Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen und dem Standard-Begrünungsszenario 1 (Bäume und Büsche). Diese Betrachtung dient zur Beantwortung der Frage, ob es sinnvoller ist an einigen Stellen Wasserflächen anstelle von Apfelbäumen vorzusehen. Es wird deutlich, dass die zusätzlichen Apfelbäume für niedrigere Temperaturen auf den Grundstücken sorgen, während bei Anordnung von Wasserflächen anstelle von Bäumen der Bereich der zentralen Straße von niedrigeren Lufttemperaturen profitiert. Der Betrag der Temperaturänderungen in den Gärten und über der zentralen Straße ist nahezu gleich (0,96 K zu 0,91 K). Allerdings ist die Fläche, die von Bäumen anstelle von Wasserflächen profitiert, etwas größer.



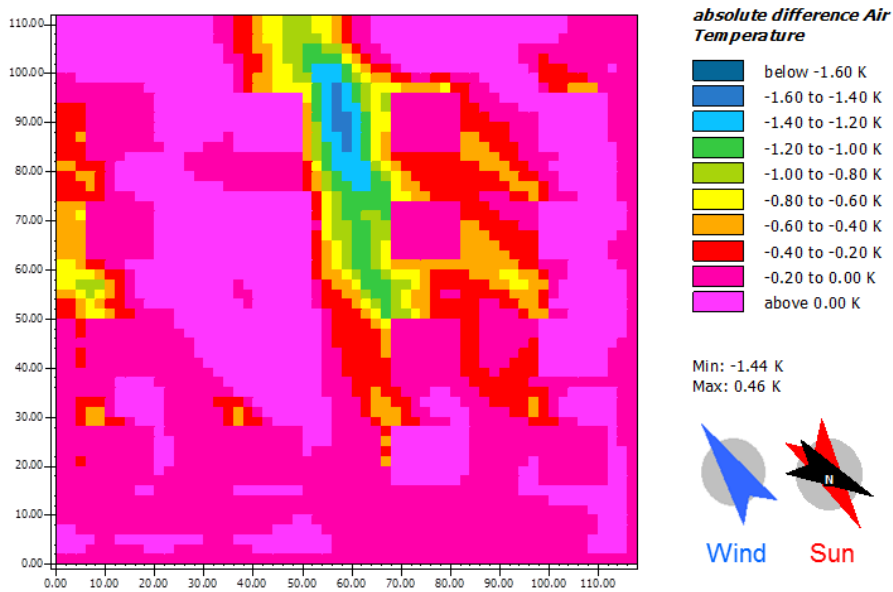


Abbildung 161: Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit Begrünungsszenario 1b ohne Wasserflächen

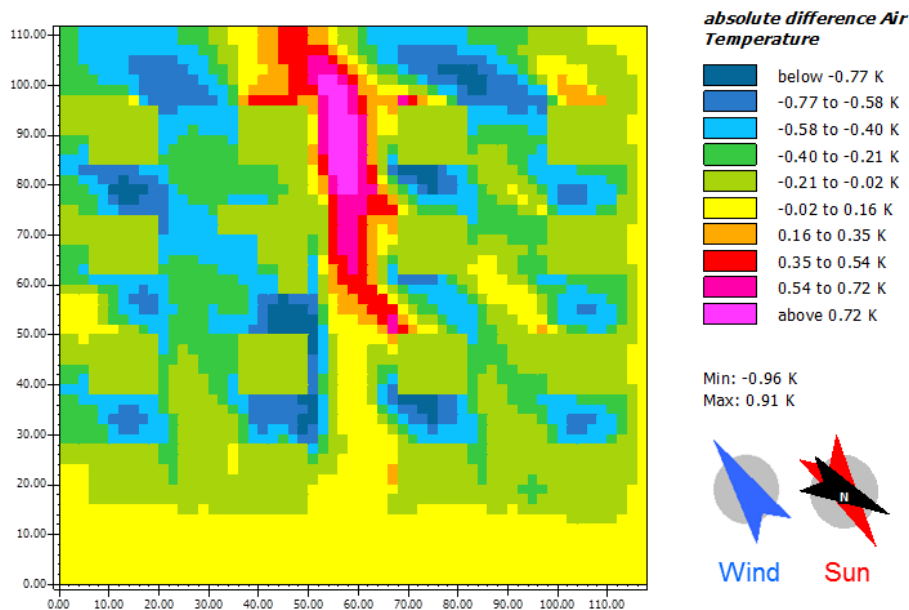


Abbildung 162: Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit Begrünungsszenario 1 (mehr Apfelbäume)

Die Abbildung 163 zeigt die Veränderung der Lufttemperatur durch das Begrünungsszenario 1 mit Bäumen und Büschen gegenüber dem Ausgangsszenario mit 10 cm hohen Grasflächen und keiner weiteren Begrünung. Die Abbildung 164 zeigt den selben Vergleich für das Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen. Auch die direkte Gegenüberstellung verdeutlicht nochmals die Aussage der Abbildung 162. Man erkennt insbesondere die stärkere Reduktion der Lufttemperatur in den Gärten bei Anordnung der zusätzlichen 12 Apfelbäume und die stärkere Reduktion der Lufttemperatur im Bereich der Straße bei Verwendung der Wasserflächen. Die maximale Lufttemperaturreduktion ist allerdings bei dem Szenario mit mehr Bäumen (Abbildung 163) größer, als bei dem Szenario mit Wasserflächen (Abbildung 164).

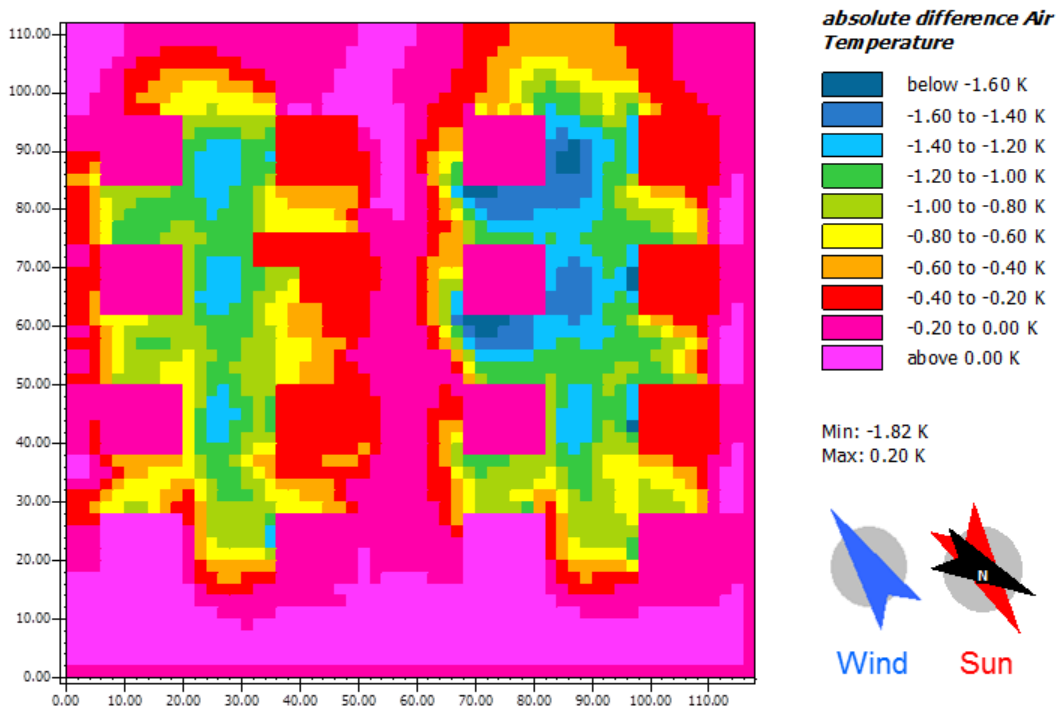


Abbildung 163: Begrünungsszenario 1 mit Bäumen und Büschen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit dem Ausgangsszenario (nur Gras)

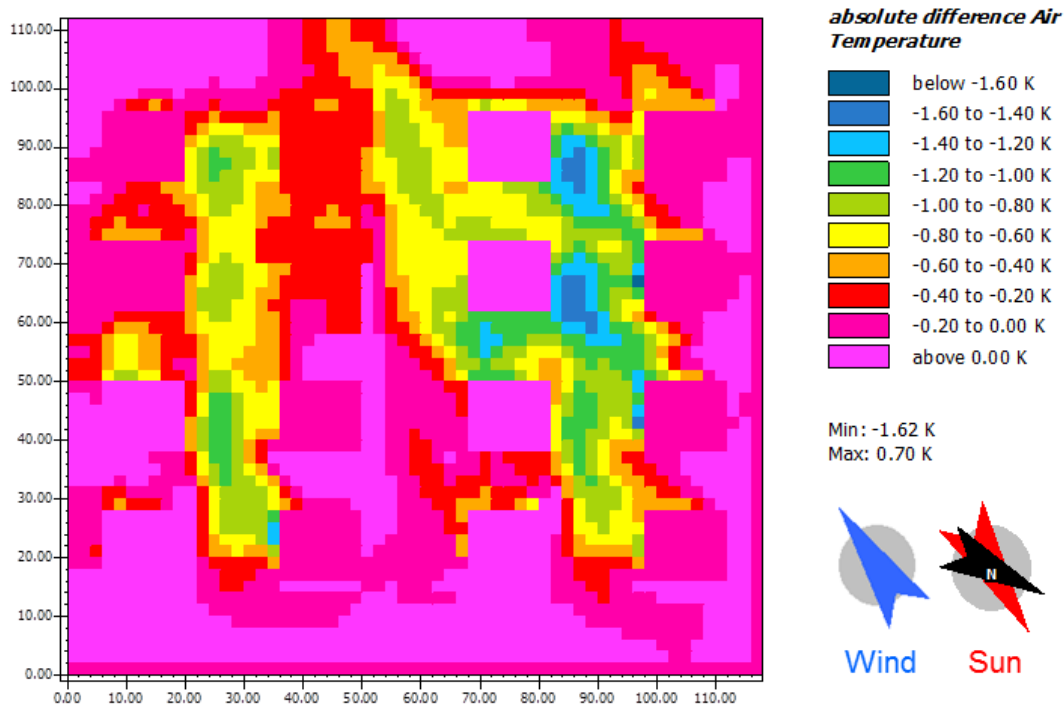


Abbildung 164: Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit dem Ausgangsszenario (nur Gras)

Abbildung 165 zeigt den Vergleich der physiologisch äquivalenten Temperatur zwischen dem Begrünungsszenario 1b (Reduzierte Anzahl Bäume und Büsche mit Wasserflächen) und dem Begrünungsszenario 1 (Bäume und Büsche). Der Vergleich der physiologisch äquivalenten Temperatur zeigt in großen Bereichen kaum eine Veränderung. Direkt unter den Apfelbäumen wird eine geringere physiologisch äquivalente Temperatur erreicht, als über den Wasserflächen. Man erkennt, dass der Schattenwurf der Bäume für die physiologisch äquivalente Temperatur entscheidender ist als die Verdunstung des Wassers. Durch die Verschattung wird der Strahlungsaustausch zwischen einer dort befindlichen Person und der Sonne unterbunden. Allerdings würde sich auf oder über den Wasseroberflächen keine Person aufhalten, jedoch an den Rändern um die Wasserflächen herum. Vernachlässigt man die PET-Änderung direkt unter den Bäumen, dann halten sich die Flächen, die von einer PET-Verbesserung durch die Einführung von Wasserflächen profitieren und die, die darunter leiden ungefähr die Waage.

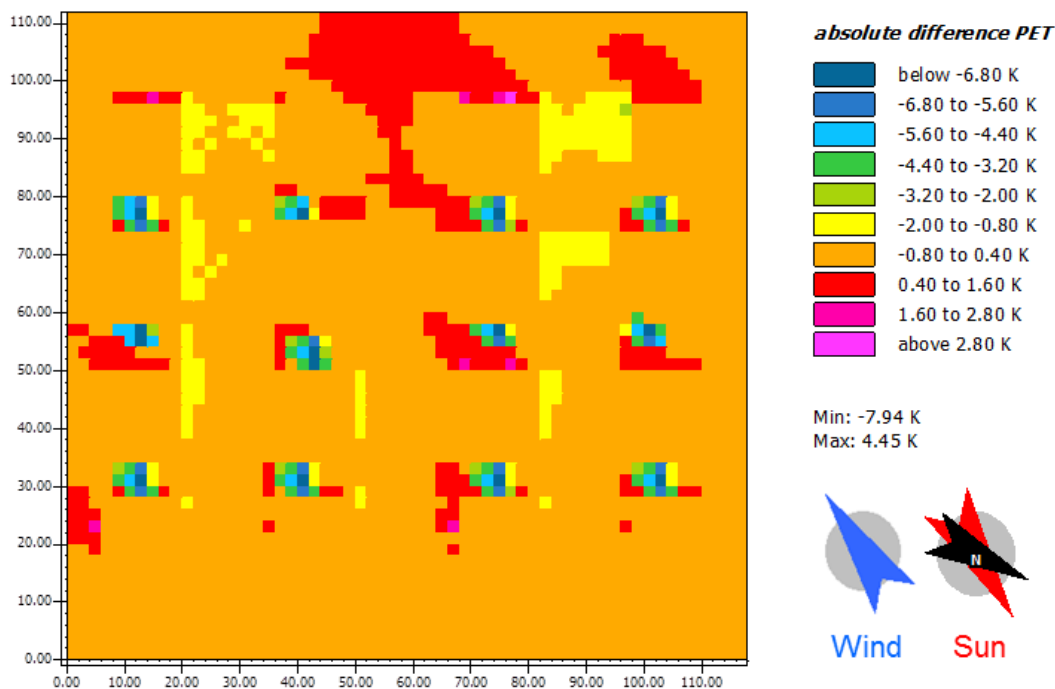


Abbildung 165: Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET in °C um 14.00 Uhr im Vergleich mit Begrünungsszenario 1 (mehr Apfelbäume)

Abbildung 166 zeigt die Veränderung der physiologisch äquivalenten Temperatur durch das Begrünungsszenario 1 mit Bäumen und Büschen gegenüber dem Ausgangsszenario mit 10 cm hohen Grasflächen und keiner weiteren Begrünung. Abbildung 167 zeigt dasselbe für das Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen. Der direkte Vergleich zwischen Abbildung 166 und Abbildung 167 verdeutlicht die geringe Auswirkung der Wasserflächen auf die PET in deren direkter Umgebung. Die maximale Reduktion der physiologisch äquivalenten Temperatur ist im Begrünungsszenario 1 geringfügig höher als im Begrünungsszenario 1b. Allerdings wird im Begrünungsszenario 1 (Bäume und Büsche) an manchen Stellen auch eine Erhöhung der physiologisch äquivalenten Temperatur gegenüber dem Ausgangsszenario festgestellt. Dies ist auf die reduzierten Windgeschwindigkeiten durch die Bepflanzung zurückzuführen. Teilweise ergeben sich die Erhöhungen der physiologisch äquivalenten Temperatur auch im Inneren der Gebäude, was für die vorliegende Betrachtung nicht von Interesse ist.

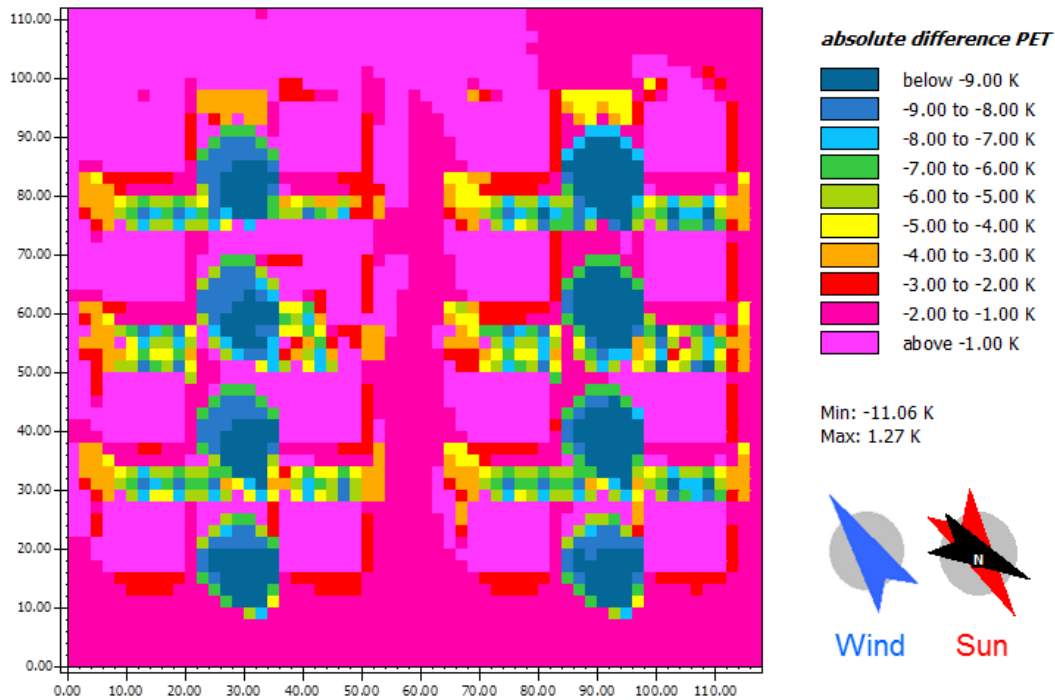


Abbildung 166: Begrünungsszenario 1 mit Bäumen und Büschen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit dem Ausgangsszenario (nur Gras)

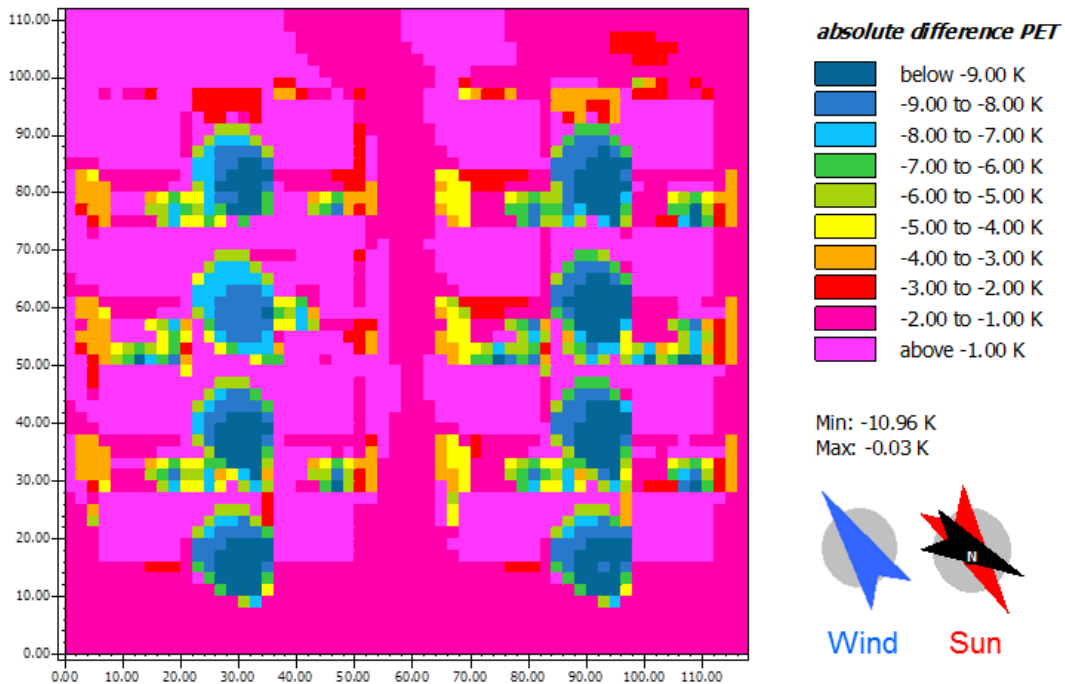


Abbildung 167: Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit dem Ausgangsszenario (nur Gras)

Die Unterschiede zwischen dem Szenario mit mehr Apfelbäumen und dem Szenario mit weniger Apfelbäumen und dafür Wasserflächen sind insgesamt relativ gering, so dass hinsichtlich der Frage, ob Wasserflächen oder Bäume für das Mikroklima zu bevorzugen sind keine klare Empfehlung ausgesprochen werden kann. Hierfür wären weitergehende und ausführlichere Untersuchungen erforderlich. Insbesondere müssten Mikroklimasimulationen für einen Betrachtungszeitraum von mindestens einer Woche durchgeführt werden, um die Auswirkungen der Wärmespeicherefähigkeit der Teiche auf die Nachttemperaturen im Detail untersuchen zu können. Hierfür sind die Rechenkapazitäten normaler Arbeitsplatzrechner aktuell nicht ausreichend.

### 9.5.11. Helle Straßenoberflächen

Im bisherigen Verlauf der Betrachtungen wurde für die Straßenoberflächen von Asphaltdecken ausgegangen. In einem weiteren Schritt wurden die Auswirkungen des Straßenaufbaus und insbesondere der Reflexivität der Straßenoberflächen auf das Mikroklima im Detail untersucht. Hierfür wurde erneut die Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung betrachtet. Entsprechend der FGSV (2012) wurde für die Belastungsklasse Bk1,0, die für Wohnstraßen und Sammelstraßen Anwendung findet, jeweils eine Bauweise mit Asphaltdecke und mit Betondecke definiert. Die verwendeten Straßenaufbauten gelten für Böden der Frostepfindlichkeitsklasse F2 in der Frosteinwirkungszone II. Ziel der Betrachtung ist es die mikroklimatischen Unterschiede aufzuzeigen, die sich ergeben, wenn anstatt einer gewöhnlichen Asphaltdecke eine helle Betondecke für den Straßenaufbau verwendet wird. Entsprechend Krispel et al. (2017: 38) wurde für die Albedo der Asphaltdecke ein Wert von 0,13 und für die Albedo der hellen Betondecke ein Wert von 0,57 (Whitetopping „weiß“) angesetzt. Abbildung 168 verdeutlicht die Unterschiede zwischen den beiden Berechnungsmodellen hinsichtlich der Reflexionseigenschaften der Deckschichten.

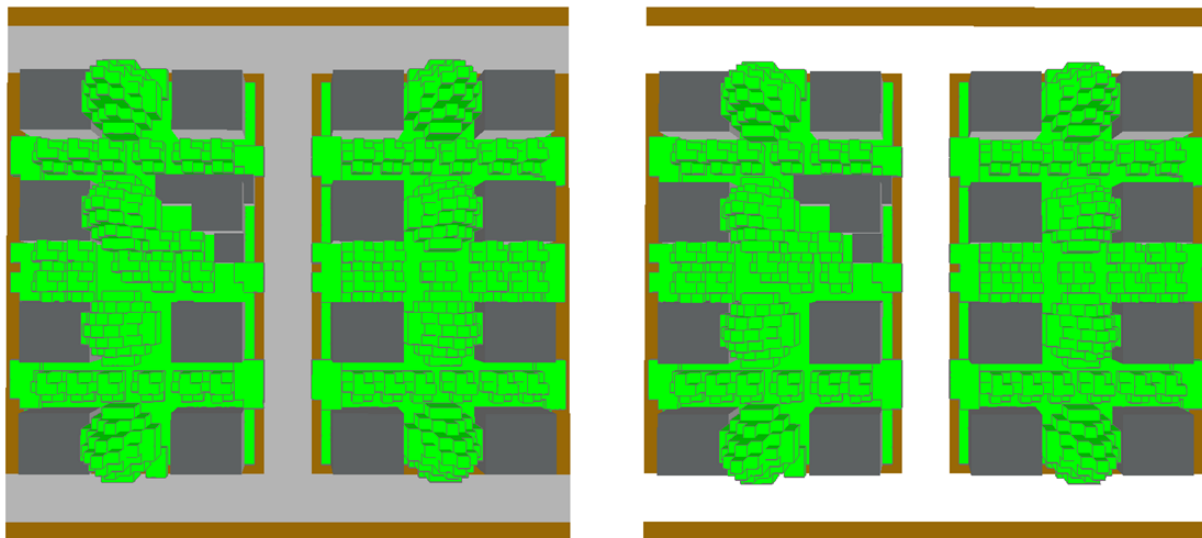


Abbildung 168: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung mit Asphaltdecke und heller Betondecke

Abbildung 169 vergleicht die Lufttemperaturen des Szenarios mit Asphaltdecke mit denen des Szenarios mit heller Betondecke. Es wird deutlich, dass insbesondere über den Straßenflächen und den in Windrichtung direkt angrenzenden Gartenflächen die Lufttemperaturen bei Verwendung eines Straßenaufbaus mit Asphaltdecke erhöht sind. Die maximale Lufttemperaturdifferenz von 1,55 K ergibt sich über der Straßenoberfläche, die die Wohngebiete trennt.

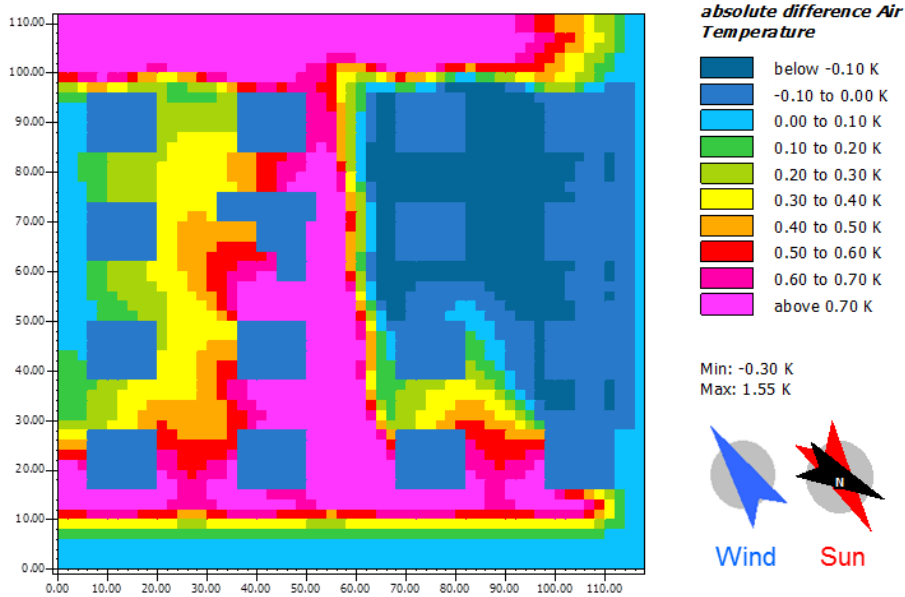


Abbildung 169: Vergleich der Lufttemperaturen in K in 1,5 m über Oberkante Gelände zwischen heller Betonoberfläche und Asphaltdecke.

Die Abbildung 170 und die Abbildung 171 zeigen die physiologisch äquivalente Temperatur bei Verwendung einer hellen Betondecke respektive Asphaltdecke. Es ist deutlich zu erkennen, dass die physiologisch äquivalente Temperatur bei Verwendung einer hellen Betondecke über den Straßen und den in Richtung der Sonnenstrahlung direkt angrenzenden Bereichen erhöht ist. Dies ist auf die Reflexion der Sonnenstrahlung an der Straßenoberfläche zurückzuführen. Dadurch trifft auf der Körperoberfläche einer Person, die sich auf der Straße befindet, mehr kurzweilige Strahlung auf. Dieser Effekt ist für das Temperaturempfinden bedeutender als die höhere Lufttemperatur über der Asphaltoberfläche. Dies wird durch die Untersuchungen von Krispel et al. (2017: 38. f) bestätigt.

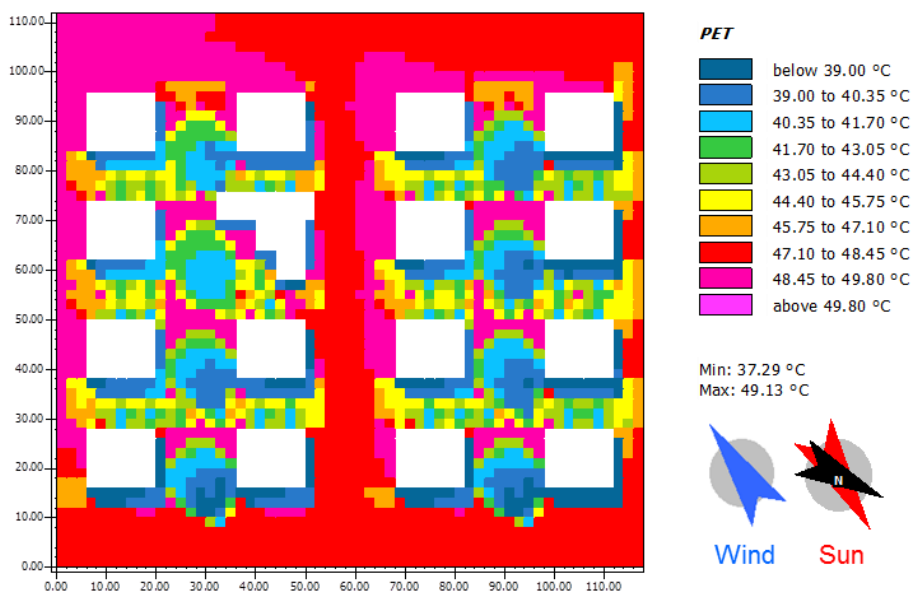


Abbildung 170: Physiologisch äquivalente Temperatur in °C bei Verwendung einer hellen Betondecke, Potsdam 2010 Sommer

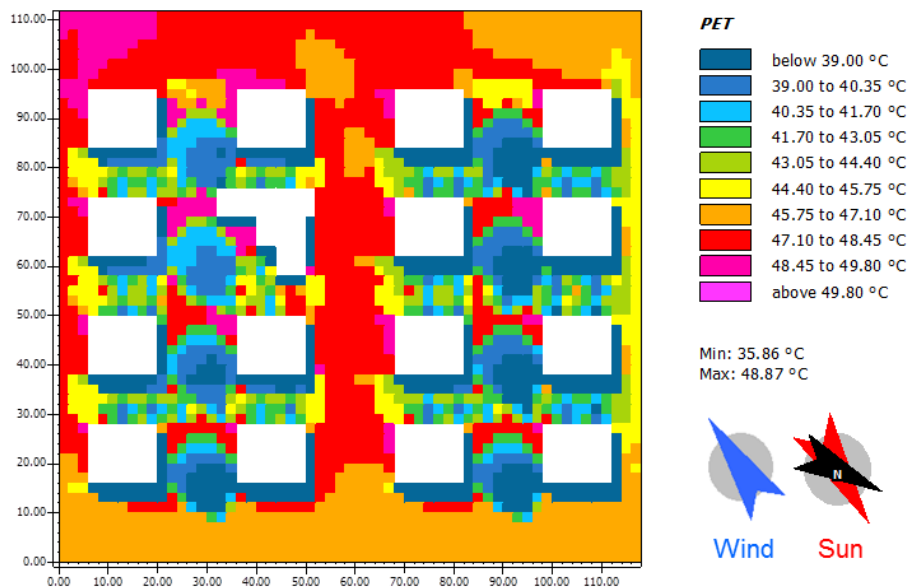


Abbildung 171: Physiologisch äquivalente Temperatur in °C bei Verwendung einer Asphaltdecke, Potsdam 2010 Sommer

### 9.5.12. Auswirkungen der Außenanlagen- und Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima

Ein ausführlicher Literaturüberblick zu den Auswirkungen von Begrünungen auf den Energiebedarf von Gebäuden findet sich in Raji/Tenpierik/van den Dobbelsteen (2015). Jaffal/Ouldboukhite/Belarbi (2012) untersuchte für ein Einfamilienhaus mit Flachdach die Auswirkungen einer zusätzlichen Dachbegrünung auf die Lufttemperatur im Innenraum sowie den Heizwärme- und Kühlbedarf. Die Untersuchungen fanden für das gemäßigte, ozeanische Klima von La Rochelle in Frankreich statt (Klima Cfb nach Köppen und Geiger). Dabei wurde der Dämmstandard des Flachdachs variiert. Prinzipiell kann durch die Dachbegrünung eine Reduktion der sommerlichen Lufttemperatur im Innenraum, des Kühlbedarfs und des jährlichen Gesamtenergiebedarfs erreicht werden. Bei hohen Dämmstandards des Flachdachaufbaus kann die Lufttemperatur im Innenraum an einem heißen Sommertag durch eine zusätzliche Dachbegrünung immer noch um 1,0 K reduziert werden. Der Kühlbedarf kann um über 60 % reduziert werden. In einem weiteren Schritt wurden die Klimarandbedingungen variiert. Es wurden zusätzlich die Klimata von Athen und Stockholm betrachtet. Je wärmer das Klima, umso ausgeprägter ist der Einfluss einer Dachbegrünung auf die Lufttemperaturen im Innenraum. In der Untersuchung von ebd. (2012) konnte gezeigt werden, dass sich das Gründach im gemäßigten Klima kaum auf den Heizwärmebedarf auswirkt, während im kälteren Stockholmer Klima eine Reduktion und im mediterranen Klima eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs festgestellt wird. In allen Klimata kann der jährliche Energiebedarf durch das Gründach reduziert werden. Ascione et al. (2013) untersuchten für ein gedämmtes eingeschossiges Bürogebäude (Wärmedurchgangskoeffizient des unbegrünten Dachs:  $0,377 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) die Entwicklung des jährlichen Primärenergiebedarfs für Heizung und Kühlung, wenn eine Dachbegrünung hinzugefügt wird. Sowohl für mediterrane Klimabedingungen, als auch für gemäßigte und kältere Klimata konnte eine Reduktion des jährlichen Energiebedarfs festgestellt werden. Dabei sind die Effekte unter mediterranen Klimabedingungen stärker ausgeprägt. Zu den Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf Oberflächentemperaturen und den Energiebedarf von Gebäuden wird auf Kapitel 8.5.3 verwiesen.

Die Relevanz der Gebäudebegrünung für die Oberflächentemperaturen von Bauteilen und damit auf die Innenraumtemperaturen und den Energiebedarf von Gebäuden wird in der Fachliteratur ausführlich diskutiert. Darauf aufbauend wurde im weiteren Verlauf der Arbeit analysiert, wie sich die Begrünung von

- Außenanlagen,
- Außenanlagen und Dachflächen sowie
- Außenanlagen, Dachflächen und Fassaden

der Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung auf das Innenraumklima des Mustergebäudes auswirkt. Die folgenden Untersuchungen wurden auf Grundlage der zuvor aufgezeigten Ergebnisse der Mikroklimasimulationen wiederum für die Expositionsklasse 2 – sommer-fokussiertes Testreferenzjahr 2010 für die Repräsentanzstation Potsdam – durchgeführt. Der betrachtete Tag ist ebenfalls nach wie vor der 27. Juli.

Um hochwertige Aussagen zum Innenraumklima zu erhalten wurde eine Koppelung der thermisch-dynamischen Gebäudesimulationssoftware IDA ICE mit der Mikroklimasimulationssoftware ENVI-MET durchgeführt. Zunächst wurde wie in Kapitel 6.1 beschrieben eine thermisch-dynamische Gebäudesimulation für das Mustergebäude mit den Randbedingungen für den sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2:2013-02 durchgeführt. Die in IDA ICE für den frühen Morgen des 27. Juli simulierten Innenraumtemperaturen wurden als Ausgangszustand für die Innenraumtemperaturen der Gebäude der Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung in der Mikroklimasimulation mit ENVI-MET angesetzt. Anschließend wurden die Mikroklimasimulationen für den 27. Juli durchgeführt.

Im Ausgangsszenario wird von einer Begrünung der Außenanlagen nur mit Rasen und den vorgegebenen Standardaufbauten der Musterliegenschaft für die Außenwände und Dachflächen ausgegangen (vgl. Kapitel 7). Dementsprechend besteht der Warmdachaufbau aus einer Stahlbetondachdecke mit Dämmung aus 20 cm extrudiertem Polystyrol-Hartschaum und 10 cm Bekiesung. In den Szenarien mit Dachbegrünung wird die 10 cm dicke Kiesschicht durch eine 15 cm dicke Substratschicht mit einer extensiven Begrünung aus Stauden, Gräsern und Sukkulente ersetzt. Die Fassadenbegrünung besteht aus Moos auf einer Trägerplatte und wird vor dem Standard-Wandaufbau des Mustergebäudes platziert. Folgende Phänomene, die mit ENVI-MET abgebildet werden können, haben Einfluss auf das Innenraumklima:

- Reduktion der Außenlufttemperatur durch Begrünung,
- Veränderung der Luftfeuchtigkeit durch Begrünung,
- Veränderung lokaler Windgeschwindigkeiten,
- Verschattung und dadurch Temperaturreduktion der Bauteiloberflächen durch die Begrünung der Außenanlagen und der Bauteile,
- Dämmwirkung des Substrats und der Pflanzen zwischen Außenluft und Bauteiloberflächen.

Diese Auswirkungen der Begrünung wurden mit Hilfe von ENVI-MET quantifiziert und anschließend zurück in die thermisch-dynamische Gebäudesimulationssoftware IDA ICE übertragen. Um die Veränderungen der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit infolge der Begrünung in IDA ICE abbilden zu können, wurden neue Klimadatensätze auf Grundlage der ENVI-MET Ergebnisse erstellt und als Eingangsdatensatz für die thermisch-dynamische Simulation in IDA ICE verwendet. Für die in ENVI-MET simulierte relative Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur wurden stündliche Flächenmittelwerte über das Untersuchungsgebiet extrahiert. Es konnte festgestellt werden, dass sich bereits im Ausgangsszenario Unterschiede zu den Originalwerten des Testreferenzjahrsdatensatzes ergeben. Dementsprechend wurde für das Ausgangsszenario ein mit IDA ICE kompatibler Klimadatensatz erstellt, der auf den in ENVI-MET simulierten, stündlichen relativen Luftfeuchtigkeiten und Lufttemperaturen des 27. Juli basiert.



Die in ENVI-MET simulierte relative Luftfeuchtigkeit verändert sich zwischen den Begrünungsszenarien nur unwesentlich, weshalb für die Erstellung der Klimadatensätze für die drei Begrünungsszenarien die stündlichen Luftfeuchtwerte des Ausgangsszenarios verwendet und nur die flächengemittelten Lufttemperaturen angepasst wurden. Die im Verlauf des 27. Juli auftretende, maximale stündliche Lufttemperaturdifferenz je Begrünungsszenario im Vergleich zum Ausgangsszenario mit ausschließlicher Gras-Begrünung sind in Tabelle 89 aufgezeigt.

Tabelle 89: Maximale Lufttemperaturdifferenzen in K je Begrünungsszenario

Begrünungsszenario	Maximale Lufttemperaturdifferenz im Verlauf des 27. Juli
Außenanlagen (Bäume und Büsche)	-0,78 K
Außenanlagen und extensive Dachbegrünung	-0,87 K
Außenanlagen, extensive Dachbegrünung und Moosfassade	-1,22 K

Die in ENVI-MET simulierten Oberflächentemperaturen aller Fassaden- und Dachflächen berücksichtigen die Verschattung durch Bäume und Büsche, die Verschattung und Dämmwirkung von Bauteilbegrünungen, die Veränderung lokaler Windgeschwindigkeiten durch die Bepflanzung sowie das Zusammenspiel mit der Außenlufttemperatur. Durch die in ENVI-MET integrierte Strömungssimulation werden die Veränderungen der lokalen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen infolge der Begrünung berücksichtigt. Diese wirken sich auf die Wärmeübergangswiderstände an den außenseitigen Bauteiloberflächen und damit auf die Bauteiloberflächentemperaturen aus. In ENVI-MET wurden die Oberflächentemperaturen sämtlicher Fassaden- und Dachoberflächen unterhalb der Begrünung (falls vorhanden) für jede Stunde des 27. Juli aufgezeichnet und extrahiert. Die so gewonnenen stündlichen Oberflächentemperaturen wurden bauteilgenau an die jeweiligen Bauteiloberflächen in IDA ICE angebunden und ersetzen die standardmäßige hinterlegte Oberflächentemperaturberechnung. Die Verschattung der Fensterflächen wurde in der thermisch-dynamischen Gebäudesimulation durch in SketchUp erstellte Hecken- und Baummodelle, die als externe Verschattungselemente eingefügt wurden, berücksichtigt. In die Auswertung wurden die Zonen 6, 9 und 12 einbezogen (vergleiche Abbildung 172)

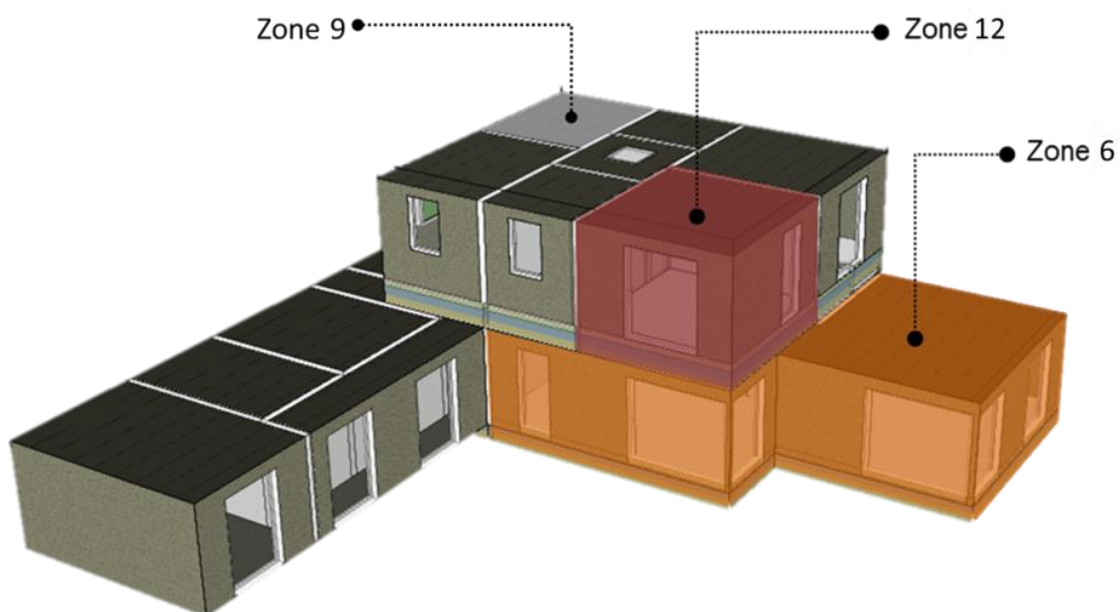


Abbildung 172: Ausgewertete Zonen der Musterliegenschaft

Tabelle 90: Übertemperaturgradstunden in Kh/a gemäß DIN 4108-3:2018-10 und prozentuale Veränderung in Bezug zum Ausgangsszenario

	Zone 6	Zone 9	Zone 12
Ausgangsszenario (nur Gras)	106,5	105,1	111,6
Außenanlagen (Bäume und Büsche)	101,4 / -4,8 %	97,8 / -6,9 %	101,8 / -8,8 %
Außenanlagen, extensive Dachbegrünung	98,5 / -7,5 %	88,9 / -15,4 %	92,3 / -17,3 %
Außenanlagen, extensive Dachbegrünung und Moosfassade	94,9 / -10,9 %	85,3 / -18,8 %	88,7 / -20,5 %

Da die Zone 6 nur teilweise über eine Dachfläche verfügt und diese auch noch zeitweise durch das darüber liegende Obergeschoss verschattet wird, sind die Auswirkungen einer Dachbegrünung im Vergleich zu den Zonen 9 und 12 deutlich geringer. Werden sämtliche Begrünungen gemäß Kapitel 9.5.9 in der definierten Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung durchgeführt, dann ergeben sich maximale Reduktionen der Übertemperaturgradstunden im Mustergebäude von bis zu 20 % gegenüber dem Ausgangszustand mit ausschließlich Grasflächen und fehlender Gebäudebegrünung.

## 10. Checklisten

Die Ergebnisse für die untersuchten Bauteilaufbauten werden in Checklisten überführt. Die Checklisten ermöglichen eine schnelle Übersicht, um die Exposition eines Bauteils gegenüber den Klimaeinwirkungen zu ermitteln. Ebenso wird schnell ersichtlich, welche Klimaeinwirkungen keinen Einfluss auf das Bauteil haben oder welche Klima- und Umweltpotentiale vom entsprechenden Bauteil nicht beeinflusst werden. Die Checklisten dienen ebenso dazu, Vergleiche zwischen den einzelnen Bauteilaufbauten einer Bauteilgruppe zu ziehen. Findet eine qualitative Bewertung statt, wird ein fünfstufiges Bewertungssystem mit den Kategorien --, -, o, + und ++ angewendet. Dadurch wird deutlich, welche Klima- und Umweltpotentiale von einem Bauteil positiv oder negativ beeinflusst werden.



## 10.2. Fußbodenaufbau

Tabelle 92: Checkliste für den Fußbodenaufbau

	Widerstand gegen						Klimapotentiale				Umweltpotentiale			Kapitel
	Starkregen	Hochwasser	Hagel	Hitze	Sturm		Ökobilanz		Regenwasserretention	Mikroklima	Recycling	Biodiversität	Feinstaub	
							GWP	PENRT						
<b>Gussasphaltestrich</b>	Wasserresistent	Wasserresistent					++	+			+			7,5,5
<b>Schwimmender Zementestrich</b>	Bei Wassereintritt vulnerabel	Bei Wassereintritt vulnerabel					--	++			++			7,5,5
<b>Wasserfeste Dämmung, leicht rückbaubarer Bodenbelag</b>	Bei Wassereintritt nur Bodenbelag vulnerabel	Bei Wassereintritt nur Bodenbelag vulnerabel					+	-			-			7,5,5
<b>Wasserfeste Dämmung, dichter Bodenbelag</b>	Bei Wassereintritt gering vulnerabel	Bei Wassereintritt gering vulnerabel					-	--			--			7,5,5

### 10.3. Außenwand

Tabelle 93: Checkliste für die Außenwand

	Widerstand gegen						Klimapotentiale			Umweltpotentiale			Kapitel
	Starkregen	Hochwasser	Hagel	Hitze	Sturm		Ökobilanz	Regenwasserretention	Mikroklima	Recycling	Biodiversität	Feinstaub	
<b>Kalksandstein mit WDVS</b>	Resilient gegen Schlegregen nach DIN 4108-3	In Abhängigkeit des Dämmmaterials Austausch der Dämmebene	WDVS bis zu HW5	Hohe thermische Speichermasse			-	-	Ja, bei hellem Putz	--			7.2.1 7.4.3 7.5.6 7.6.4
<b>Beton mit WDVS</b>	Resilient gegen Schlegregen nach DIN 4108-3	In Abhängigkeit des Dämmmaterials Austausch der Dämmebene	WDVS bis zu HW5	Hohe thermische Speichermasse			--	--	Ja, bei hellem Putz	--			7.2.1 7.4.3 7.6.4
<b>Monolithischer Ziegel (Thermoplan)</b>	Resilient gegen Schlegregen nach DIN 4108-3	Wassereingängen in Hohlräumen, hohe kapillare Saugfähigkeit	Min. HW5	Hohe thermische Speichermasse			+	+	Ja, bei hellem Putz	++			7.2.1 7.4.3
<b>Zweischaliges Mauerwerk</b>	Resilient gegen Schlegregen nach DIN 4108-3	Wassereingängen in Hinterlüftung, wasserfester Dämmstoff nötig	Min. HW5	Hohe thermische Speichermasse			--	--	Abhängig von Farbgebung der Verblendschale	+ -			7.2.1 7.4.3 7.5.6

Tabelle 94: Fortführung Checkliste für die Außenwand

	Widerstand gegen					Klimapotentiale				Umweltpotentiale			Kapitel
	Starkregen	Hochwasser	Hagel	Hitze	Sturm	Ökobilanz	Regenwasserretention	Mikroklima	Recycling	Biodiversität	Feinstaub		
	Resilient gegen Schlägen, wenn Anteil der Öffnungen < 5 % und Fugenbreite < 1,5 mm	Außere Fassade-schicht nicht wasserdicht ausführbar, Rückbau bei ausreichender Vorwarnzeit möglich	Abhängig von Fassadenmaterial, HW 5 möglich	Vermeidung von Hitze-stau durch Hinterlüftung	In Abhängigkeit der Eckausführung reduzierte Sogkräfte							GWP	
<b>Vorgehängte hinterlüftete Fassade</b>						+		Vermeidung von Hitze-stau, Auswahl von hellen Fassadenmaterialien	+			7.2.1 7.4.3 7.5.6 7.6.4 7.7.2	
<b>Holzständerbauweise</b>	Abhängig von Fassaden-gestaltung	Aufwendige Trocknung notwendig	Abhängig von Fassaden-gestaltung	Geringe thermische Speicher-masse	Abhängig von Fassaden-gestaltung	+		Abhängig von Fassade-gestaltung	+			7.2.1	
<b>Begrünte Fassade</b>	Bei Starkregen versagt Regenwas-serfück-haltung der Begrünung	Möglicher-weise Be-schädigung bei wande-bundenen Systemen	Möglicher-weise Be-schädigung der Pflanzen und Unterkon-struktion bei wande-bundenen Systemen	Verschattung und Verdun-stungskühlung	Abriss / Beschädigung der Begrü-nung möglich	Abhängig von Unterkonstruktion	Bis bestimmte Nieder-schlagshöhe	Verschattung und Verdun-stungskühlung	0	In Abhängig-keit der Pflanzenaus-wahl	In Abhängig-keit der Pflanzenaus-wahl	7.5.6 8.2.3	
<b>Raffstore</b>			Raffstore bis HW1, Schutz durch Sensoren	Reduktion solarer Ener-gieeinträge	Windstabile Raffstore oder Schutz durch Sensoren							7.6.1	

## 10.4. Dach

Tabelle 95: Checkliste für das Dach

	Widerstand gegen					Klimapotentiale				Umweltpotentiale			Kapitel
	Starkregen	Hochwasser	Hagel	Hitze	Sturm	Ökobilanz GWP	PENRT	Regenwasserretention	Mikroklima	Recycling	Biodiversität	Feinstaub	
<b>Massivdach mit freiliegender dunkler Dachbahn</b>	Bei Ausführung der Dachabdichtung nach Stand der Technik ungefährdet		Hagelbahnen bis HW5	Hohe thermische Belastung von Innenraum und Umgebung	Bei entsprechender Befestigung keine Gefährdung	+	+	--	--	+	--	--	7.2.1 7.3.4 7.4.4 7.6.3
<b>Massivdach mit freiliegender heller Dachbahn</b>	Bei Ausführung der Dachabdichtung nach Stand der Technik ungefährdet		Hagelbahnen bis HW5	Reduzierte thermische Belastung von Innenraum und Umgebung	Bei entsprechender Befestigung keine Gefährdung	+	+	--	○	+	--	--	7.2.1 7.3.4 7.4.4 7.6.3
<b>Massivdach mit Kiesdeckung, Umkehrdach</b>	Bei Ausführung der Dachabdichtung nach Stand der Technik ungefährdet		Abdichtung der Einwirkung entzogen	heller Kies mit geringer Korngröße reduziert thermische Belastung von Innenraum und Umgebung	Bei entsprechender Befestigung keine Gefährdung	--	--	-	○	--	-	--	7.2.1 7.3.4 7.4.4 7.6.3



Tabelle 96: Fortführung der Checkliste für das Dach

	Widerstand gegen					Klimapotentiale				Umweltpotentiale			Kapitel
	Starkregen	Hochwasser	Hagel	Hitze	Sturm	Ökobilanz	Regenwasserretention	Mikroklima	Recycling	Biodiversität	Feinstaub		
						GWP	PENRT						7.3.4 7.6.3 8.2.2 9.4.2
<b>Massivdach extensiv begrünt</b>	Bei Ausführung der Dachabdichtung nach Stand der Technik ungefährdet		Abdichtung der Einwirkung entzogen	Verschattung und Verdunstungskühle	Bei entsprechender Auflast keine Gefährdung	○	○	+	○	+	+	+	(in Abhängigkeit der Pflanzenauswahl) (in Abhängigkeit der Pflanzenauswahl)
<b>Massivdach, Retentionsdach, intensiv begrünt</b>	Bei Ausführung der Dachabdichtung nach Stand der Technik ungefährdet		Abdichtung der Einwirkung entzogen	Verschattung und Verdunstungskühlung	Bei entsprechender Auflast keine Gefährdung	○	○	++	○	++	++	○	(in Abhängigkeit der Pflanzenauswahl) (in Abhängigkeit der Pflanzenauswahl)
<b>Holzdach mit freiliegender dunkler Dachbahn</b>	Bei Ausführung der Dachabdichtung nach Stand der Technik ungefährdet		Hagelbahnen bis HW5	Hohe thermische Belastung von Innenraum und Umgebung, geringe thermische Speichermasse	Bei entsprechender Befestigung keine Gefährdung	+	+	- -	+	- -	- -	+	7.2.1 7.3.4

Tabelle 97: Fortführung der Checkliste für das Dach

Kapitel	Widerstand gegen					Klimapotentiale				Umweltpotentiale		
	Starkregen	Hochwasser	Hagel	Hitze	Sturm	Ökobilanz	Regenwasserretention	Mikroklima	Recycling	Biodiversität	Feinstaub	7.2.1 7.3.4
						GWP	PENRT					
	Bei Ausführung der Dachabdichtung nach Stand der Technik ungefährdet		Hagelbahnen bis HW5	Reduzierte thermische Belastung von Innenraum und Umgebung, geringe thermische Speichermasse	Bei entsprechenden Befestigung keine Gefährdung	+	+	○	+	--	--	7.2.1 7.3.4
	Bei Ausführung der Dachabdichtung nach Stand der Technik ungefährdet		Abdichtung der Einwirkung entzogen	Bei Auswahl von hellem Kies mit geringer Korngröße reduzierte thermische Belastung von Innenraum und Umgebung, geringe thermische Speicher- masse	Bei entsprechenden Befestigung keine Gefährdung	+	+	○	+	-	--	7.2.1 7.3.4

Tabelle 98: Fortführung der Checkliste für das Dach

Kapitel	Widerstand gegen						Klimapotentiale			Umweltpotentiale		
	Starkregen	Hochwasser	Hagel	Hitze	Sturm	Mikroklima	Regenwasserretention	Ökobilanz	Recycling	Biodiversität	Feinstaub	
	GWP		PENRT									
Geneigtes Dach mit Dachziegel	+			-- In der Regel geringe thermische Speichermaße durch Holzkonstruktion +	Bei entsprechenden Befestigung mit Sturmklammern		--	--	- (sortenrein trennbar, aber Ziegel nur bedingt in Stoffkreislauf rückführbar)	--	--	
	++ Auch bei geringer Dachneigung geeignet		+ Dachziegel bis HW5									
Geneigtes Dach mit Metalldeckung	++		- Aussehen bis HW3 Funktionalität bis HW5	-- In der Regel geringe thermische Speichermaße durch leichte Unterkonstruktion	Bei entsprechender Befestigung an Unterkonstruktion keine Gefährdung		--	+	+	--	--	

## 10.5. Dachaufbauten

Tabelle 99: Checkliste für die Dachaufbauten

Kapitel	Widerstand gegen					Klimapotentiale			Umweltpotentiale			
	Starkregen	Hochwasser	Hagel	Hitze	Sturm	Ökobilanz GWP	PENRT	Regenwasserretention	Mikroklima	Recycling	Biodiversität	Feinstaub
7.6.2			Sowohl mit Glas als auch mit Kunststoff mit HW5 möglich, aber Versprödung des Kunststoff durch UV	Direkter solarer Wärmeeintrag ins Gebäude über den Tag								
7.6.5 7.7.1			Nach internationalen Normen i.d.R. max. HW5, mit Hagelprüfung bis zu HW5		Bei optimierter Ausrichtung und Anordnung der Module können Sogkräfte reduziert werden							
7.7.1				Abgerundete Attika reduziert Sogkräfte auf Dach								
<b>Lichtkuppeln / Lichtbänder</b>												
<b>PV-Anlagen / Solarthermie</b>												
<b>Attika</b>												

## 10.6. Außenanlagen

Tabelle 100: Checklisten für die Außenanlagen

Kapitel	Umweltpotentiale			Klimapotentiale			Widerstand gegen					
	Recycling	Biodiversität	Feinstaub	Ökobilanz	Regenwasserretention	Mikroklima	Hochwasser	Hagel	Hitze	Sturm	GWP	PENRT
Begrünung	<p>++ Geländemodellierung Außenanlagen, Retentionsmulden, Rigolen, Retentionsdäch</p> <p>+ Dachbegrünung (intensiv besser als extensiv)</p> <p>○ Fassadenbegrünung geringer Effekt</p>	<p>++ (regionale, gebietsheimische, autochthone Wildarten; Artenvielfalt und Wuchsformkombinationen; Pflanzen mit unterschiedlichen Blühzeiten für Feinstaubabscheidungspotenzial von Moosen)</p>	<p>++</p> <p>Thermische Behaglichkeit im Außenraum</p> <p>+</p> <p>Thermische Behaglichkeit im Innenraum</p>	<p>Dach: - in Abhängigkeit Substratschichtdicke (Treibhauspotential aus Vegetationssubstrat und großer dimensioniertem Tragwerk)</p> <p>Fassade: ○ bodengebundene Selbstklimmer; - Gerüskletterpflanzen abhängig von Unterkonstruktion</p> <p>- Wandgebunden: Abhängig von Unterkonstruktion, Aufwand für Bewässerung und Düngung</p>	<p>Dach: - in Abhängigkeit Substratschichtdicke (Treibhauspotential aus Vegetationssubstrat und großer dimensioniertem Tragwerk)</p> <p>Fassade: ○ bodengebundene Selbstklimmer; - Gerüskletterpflanzen abhängig von Unterkonstruktion</p> <p>- Wandgebunden: Abhängig von Unterkonstruktion, Aufwand für Bewässerung und Düngung</p>	<p>- Bruchanfällige Bäume in Gebäudenahe vermeiden</p> <p>- Zusätzliche Windangriffspunkte durch Pflanzen bei Fassadenbegrünung</p> <p>+ Nutzung Vegetationssubstrat für Ballastierung PV</p>	<p>Reduziert thermische Belastung auf Quartierebene</p> <p>++ Außenanlagen</p> <p>+ Fassadenbegrünung</p> <p>○ Dachbegrünung (geringer Effekt auf Straßenniveau)</p> <p>+ Thermische Behaglichkeit im Innenraum</p>	<p>++</p> <p>Dachbegrünungssubstrat schützt Abdichtungsbahn</p>	<p>++</p> <p>Dachbegrünung (intensiv besser als extensiv)</p> <p>○ Fassadenbegrünung geringer Effekt</p>	<p>++</p> <p>Thermische Behaglichkeit im Außenraum</p> <p>+</p> <p>Thermische Behaglichkeit im Innenraum</p>	<p>Dach: - in Abhängigkeit Substratschichtdicke (Treibhauspotential aus Vegetationssubstrat und großer dimensioniertem Tragwerk)</p> <p>Fassade: ○ bodengebundene Selbstklimmer; - Gerüskletterpflanzen abhängig von Unterkonstruktion</p> <p>- Wandgebunden: Abhängig von Unterkonstruktion, Aufwand für Bewässerung und Düngung</p>	<p>Dach: - in Abhängigkeit Substratschichtdicke (Treibhauspotential aus Vegetationssubstrat und großer dimensioniertem Tragwerk)</p> <p>Fassade: ○ bodengebundene Selbstklimmer; - Gerüskletterpflanzen abhängig von Unterkonstruktion</p> <p>- Wandgebunden: Abhängig von Unterkonstruktion, Aufwand für Bewässerung und Düngung</p>

Tabelle 101: Fortführung der Checkliste für die Außenanlagen

	Widerstand gegen				Klimapotentiale			Umweltpotentiale			Kapitel			
	Starkregen	Hochwasser	Hagel	Hitze	Sturm	GWP	Ökobilanz	PENRT	Regenwasserretention	Mikroklima		Recycling	Biodiversität	Feinstaub
<b>Retentionsflächen</b>	Hält Regenwasser zurück			Kühlt Umgebungsluft					++	+		+	o	7.4.5 8.5.4 9.4.4 9.5.10
<b>Wege und Stellplätze</b>	Entsiegelung und Sickerfähigkeit		Holzterrasse evtl. gefährdet	Kaum Aufenthalt von Personen: Helle Oberflächen Häufiger Aufenthalt von Personen: Verschattung durch Bäume		++ Kunststoffrasengitter o Asphalt, Sickersteine Pflaster -- Holz (wegen geringer Lebensdauer)	+ Sickersteine, Pflaster, Kunststoffrasengitter - Holz -- Asphalt		++ Kunststoffrasengitter + Holzterrasse, Sickersteine o Pflaster -- Asphalt	Über hellen Oberflächen niedrigere Lufttemperatur, aber höhere physiologisch äquivalente Temperatur	+ Pflaster, Sickersteine, Asphalt o Kunststoffrasengitter (Rückführung in Produktion, aber wenige Standorte) - Holz (in Abhängigkeit der Behandlung)	++ bei Kunststoffrasengitter wachsender Wiese ++ bei Kunststoffrasengitter wachsender Wiese	++ bei Kunststoffrasengitter wachsender Wiese	7.2. 9.5.11.

## 11. Zusammenfassung und Ausblick

### 11.1. Zusammenfassung

Im vorliegenden Forschungsbericht des Forschungsprojekts „KLIBAU – Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens“ wurden Anpassungsmaßnahmen an die erwarteten klimawandelbedingten Änderungen der Klimaeinwirkungen aufgezeigt. Die vorgestellten Maßnahmen gehen über die reine Klimaanpassung hinaus und haben einen positiven Einfluss auf die globale und die lokale Umwelt.

Zunächst wurde anhand einer wissenschaftlichen Literaturanalyse die durch Beobachtungsdaten festgestellten sowie die über Klimamodelle projizierten Veränderungen der Klimaeinwirkungen Hitze, Starkregen, Hochwasser, Hagel und Sturm aufgezeigt. Die Erkenntnisse wurden in Expositionsclassen überführt, um allgemeingültige Aussagen über die zukünftige Entwicklung der Klimaeinwirkungen treffen zu können. Die Expositionsclassen dienen ebenso als Bemessungsgrundlage für die Anpassung der Bauteile.

Aufbauend auf den Expositionsclassen wurden bauliche Anpassungsmaßnahmen an die Klimaeinwirkungen untersucht. Für die Einwirkung Sommerhitze zeigte sich, dass die Auswahl einer geeigneten Vergleichsbeschichtung zu einer Steigerung der thermischen Behaglichkeit bei einer gleichzeitig guten Tageslichtversorgung führt. Die sorgfältige Auswahl variabler außenliegender Sonnenschutzsysteme verstärkt diesen Effekt. Natürliche Wärmesenken zur Kühlung der Innenräume über die kühlere Außenluft in der Nacht, das Erdreich oder Grundwasser tragen ebenso zum sommerlichen Wärmeschutz bei.

Mittels thermisch-dynamischen Gebäudesimulationen wurde gezeigt, dass sich die Farbwahl der Bauteiloberflächen auf die Innenraumtemperaturen im Sommer auswirkt. Die Verwendung von hellen Kunststoffdachdichtungsbahnen reduziert die Übertemperaturgradstunden im Innenraum im Vergleich zu konventionellen bituminösen Abdichtungsbahnen bei Massivbauweisen um 10 % und bei Holzbauweisen um 20 %. Werden die Abdichtungsbahnen von einer hellen 10 cm dicken Kiesschicht überdeckt, können die Übertemperaturgradstunden um weitere 55 % reduziert werden. Ebenso reduziert sich die Oberflächentemperatur der Dachfläche und die Lufttemperatur vor der Fassade.

Für die Einwirkung Starkregen zeigte sich, dass der Regenwasserabfluss bei der Bemessungsregenspende durch die Verwendung eines begrünten Flachdachs im Vergleich zu einer freiliegenden Abdichtungsbahn um bis zu 50 % verringert werden kann. Zudem kann bei einer Ausführung des Daches als Retentionsdach gespeichertes Regenwasser zur Bewässerung oder als Nutzwasser im Gebäude verwendet werden. Positiv an der Dachbegrünung ist zusätzlich die Möglichkeit zur Erschließung der Umweltpotentiale Biodiversität und Feinstaubbindung. Bei der Gestaltung der Außenanlagen kann durch eine Geländemodellierung die Gefährdung des Gebäudes durch Überflutung verringert werden. Retentionsvolumen kann durch die temporäre Verwendung von Zufahrten oder Verkehrsflächen als Rückhalteraum, die Errichtung von Sickermulden oder ähnlichen Retentionsflächen auf dem Grundstück geschaffen werden.

Im Hinblick auf die Anpassung an die Klimaeinwirkung Hochwasser und der Erschließung positiver Klima- und Umweltpotentiale wurden in diesem Forschungsprojekt zwei verschiedene Ansätze aufgezeigt. Einerseits ist es möglich, die Widerstandsfähigkeit des Bauteilaufbaus durch die Wahl von wasserfesten Materialien und geklebten Verbindungen zu erhöhen. Andererseits können leicht rückbaubare Konstruktionen eventuell mit Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen verwendet werden. Im Hochwasserfall muss der Bauteilaufbau beim ersten Ansatz nicht erneuert werden. Der zweite Ansatz hingegen ist vulnerabler gegenüber der Einwirkung Hochwasser, kann jedoch im Schadensfall mit geringem Aufwand erneuert oder bereits im Vorfeld durch Demontage der Schädigung entzogen werden. Je häufiger ein Schadensereignis im Lebenszyklus des Gebäudes auftritt, umso vorteilhafter wird die Ökobilanz des widerstandsfähigen Bauteilaufbaus im Vergleich zum vulnerableren Aufbau.

Für die Einwirkung Hagel wurden ebenso zwei Schutzstrategien analysiert. Entweder wird für die äußerste Bauteilschicht ein Material mit hohem Hagelwiderstand gewählt oder die vulnerable Schicht wird durch die Anordnung einer Schutzlage der Einwirkung vollständig entzogen. Für den Dachaufbau bedeutet dies beispielsweise, dass entweder eine freiliegende Dachdichtungsbahn mit hoher Hagelwiderstandsklasse gewählt oder die Abdichtungsbahn durch eine Kiesschicht oder Begrünung der Einwirkung entzogen wird.

Bei der Einwirkung Sturm kann durch die aerodynamische Optimierung der Attika, der Fassade sowie der Dachaufbauten die Soglasten auf den innen liegenden Dachflächen um bis zu 70 % reduziert werden. Dadurch können die notwendigen Auflasten zur Lagesicherung der Dachaufbauten geringer ausgelegt werden.

Um die Stabilität der natürlichen, einheimischen Ökosysteme zu unterstützen, sollte bei der Auswahl der Pflanzen zur Begrünung von Außenanlagen, Dachflächen und Fassaden auf Zuchtarten, gebietsfremde, potentiell invasive und invasive Arten sowie Neophyten weitgehend verzichtet werden. Dadurch kann die Biodiversität positiv beeinflusst werden. Es zeigte sich, dass durch eine Vernetzung neu geschaffener und bestehender Grünfläche Lebensräume sowie bisher isolierte Biotope miteinander verknüpft werden. Ebenso kann durch eine vielfältige Gestaltung von Außenanlagen und Dachbegrünungen vielen unterschiedlichen Lebewesen ein Lebensraum geboten werden. Die Auswahl geeigneter Pflanzen erhöht das Potential zur Feinstaubadsorption und reduziert die lokale Belastung der Luft. Auf Grundlage einer wissenschaftlichen Literaturanalyse wurden Pflanzenlisten entwickelt, die geeignete Pflanzenarten zur Begrünung aufzeigen.

Über Mikroklimasimulationen wurde zudem herausgearbeitet, dass sich die Verwendung einer geeigneten Begrünung positiv auf die Außenlufttemperatur und die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) auswirkt. Für den Siedlungsraumtyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung konnte durch eine sinnvolle Begrünung der Dächer, der Fassaden und der Außenanlagen die maximale Lufttemperatur um über 2 K reduziert werden. Infolge der Verschattung durch Bäume verringerte sich die physiologisch äquivalente Temperatur um über 12 K. In dem Forschungsprojekt wurde zudem durch eine Verknüpfung von Mikroklimasimulationen mit thermisch-dynamischen Gebäudesimulationen der Einfluss der Begrünungen auf den sommerlichen Wärmeschutz untersucht. Durch die Verschattung der Bauteile sowie der Dämmwirkung des Substrats in Kombination mit der reduzierten Außenlufttemperatur konnte eine Reduktion der Übertemperaturgradstunden im kritischen Innenraum um bis zu 20 % nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse wurden für jede Bauteilgruppe in Checklisten überführt. Diese zeigen die Resilienz jedes Bauteils gegenüber den Klimaeinwirkung sowie den jeweiligen Einfluss auf die Klima- und Umweltpotentiale auf. Anhand der Checklisten kann die Gesamt vulnerabilität der Bauteilaufbauten ermittelt werden.

## 11.2. Ausblick

Der vorliegende Forschungsbericht stellt neue Erkenntnisse für das klimaangepasste Bauen im Umgang mit den Klimaeinwirkungen Sommerhitze, Starkregen, Hochwasser, Hagel und Sturm vor. Von einer Veränderung der Intensität dieser Einwirkungen infolge des Klimawandels sind große Bereiche Deutschlands betroffen. Für die Küstengebiete einerseits und für den Alpenraum und die hohen Lagen der Mittelgebirge andererseits können weitere Einwirkungen von Bedeutung sein, die durch den Klimawandel wesentlich verstärkt werden. Für die Küstengebiete könnten weitere Untersuchungen zu den Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs und damit verbunden einer höheren Gefährdung durch Sturmfluten durchgeführt werden. Der Küstenschutz ist im Zusammenhang mit dem Klimawandel eine wesentliche Herausforderung, die im vorliegenden Bericht nicht betrachtet wurde. In den Alpen und teilweise in den Mittelgebirgen kann durch die projizierten, erhöhten Niederschlagsmengen im Winterhalbjahr bei gleichzeitig seltener gefrorenen Böden die Gefahr für Hangrutschungen unter Umständen zunehmen. Durch das Auftauen dauerhaft



gefrorener Böden in den Alpen kann sich auch die Gefahr von Steinschlag erhöhen. Diese Gefahren betreffen in Deutschland nur sehr kleine Gebiete und sind beispielsweise für die Schweiz oder Österreich von großflächiger Bedeutung.

Zahlreiche der hier aufgeführten Untersuchungen wurden auf Bauteilebene durchgeführt. Dadurch beschränken sich die ökobilanziellen Betrachtungen auf die Herstellungsphase, den Austausch einzelner Bauteilschichten und die Entsorgungsphase der Bauteile. Grundsätzlich wären weitere Studien zur Optimierung der Emissionen über den gesamten Gebäudelebenszyklus von Bedeutung. Hierfür müssten zusätzlich Berechnungen zum Energiebedarf im Gebäudebetrieb durchgeführt werden. Ebenfalls dürften die ökobilanziellen Auswirkungen zur Bewässerung und Düngung von Dach- und Fassadenbegrünungen, sowie für die erforderlichen Pflege- und Instandhaltungsmaßnahmen nicht vernachlässigt werden.

Aktuell ist es sehr schwierig, ein Optimum aus Resilienz gegenüber den Klimaeinwirkungen, den Emissionen im Lebenszyklus sowie der Erschließung der untersuchten Klima- und Umweltpotentiale zu erreichen. Bisher werden die genannten Ziele durch unterschiedliche, voneinander unabhängige Zielgrößen bewertet. Es fehlen objektive Gewichtungen zwischen den einzelnen Zielgrößen, um einen Gesamtzielerreichungsgrad zu bestimmen. Bisher ist es eine individuelle Entscheidung, ob dem Widerstand gegenüber einer Klimaeinwirkung, den grauen Emissionen der Bauteile oder der Erschließung weiterer Klima- und Umweltpotentiale der Vorzug gegeben werden soll.

Die durchgeführten Untersuchungen lassen bisher Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen weitgehend unberücksichtigt. Als wesentlicher Hinderungsgrund ist dabei die Monetarisierung der Klima- und Umweltpotentiale zu nennen. Es existieren beispielsweise keine allgemeingültigen Ansätze zur wirtschaftlichen Bewertung einer Gebäudebegrünung hinsichtlich ihres Einflusses auf den Rückgang der Artenvielfalt und Individuenanzahl von Insekten. Genauso lässt sich eine Verbesserung des Mikroklimas durch eine Gebäudebegrünung kaum in Geldeinheiten bewerten. Selbst die monetäre Bewertung von Treibhausgasemissionen ist nicht einheitlich festgelegt. Drängende Probleme, die das Wohlergehen der Menschheit wesentlich beeinflussen werden, entziehen sich aktuell noch einer wirtschaftlichen Betrachtung. Des Weiteren berücksichtigen aktuelle Preise beispielsweise für fossile Energieträger nicht die mit dem Klimawandel in Verbindung stehenden Folgekosten.

Coronese et al. (2019) konnten auf Grundlage von Schadensdaten aus den Jahren 1960 bis 2015 eine Zunahme der extremen Schadenereignisse infolge des bereits stattgefundenen Klimawandels statistisch nachweisen. Wird auf die bereits eingetretenen oder zu erwartenden Änderungen des Klimas nicht reagiert, dann werden die Schäden durch Extremwetterereignisse infolge des fortschreitenden Klimawandels weiter zunehmen. Aus diesem Grund ist die Anpassung von Gebäuden und Liegenschaften an die zu erwartenden Klimaveränderungen essentiell, um zukünftige Schäden und unbehaglichen Zuständen in Innenräumen zu vermeiden (Weller et al. 2016; Fahrion 2015). Ein Problem bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist, dass beispielsweise Maßnahmen zur Regenwasserretention nicht nur der Liegenschaft zugutekommen, an der sie durchgeführt werden, sondern im Zweifel einen deutlich größeren Effekt auf die Unterlieger aufweisen, also Liegenschaften, die infolge der Topographie durch den entstehenden Abfluss betroffen sind.

Die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt KLIBAU können als Grundlage dienen, um das klimaangepasste Bauen in das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) zu integrieren. Die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse könnten so im Bewusstsein von Architekten, Planern und Bauherrn verankert und integraler Bestandteil des öffentlichen Planungsprozesses werden.

## 12. Literaturverzeichnis

### 12.1. Literatur

- Abhijith, K. V.; Kumar, Prashant; Gallagher, John; McNabola, Aonghus; Baldauf, Richard; Pilla, Francesco; Broderick, Brian; Di Sabatino, Silvana; Pulvirenti, Beatrice, 2017: Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review. *Atmospheric Environment*, 162. Jg., S. 71–86.
- Albrecht, Wolfgang; Schwitalla, Christoph, 2015: Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS. Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des WDVS nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur energetischen Verwertung. *Forschungsinitiative ZukunftBau F*, Bd. 2932. Stuttgart.
- Alcamo, Joseph, 2003: *Ecosystems and human well-being. A framework for assessment*. Washington, DC.
- Alfes, Christoph; Schäfers, Martin, 2014: Bauphysikalische und mechanische Aspekte von Mauerwerk nach Flutkatastrophen. *Mauerwerk*, 18. Jg. (5), S. 304–313.
- Altaha, Nasser, 2012: *Verblendmauerwerk. Planung und Ausführung*. 7. Auflage. Bonn.
- Altaha, Nasser, 2015: Veneer walls of masonry as specified in EC 6 (DIN EN 1996-2/NA) / Zweischaliges Mauerwerk nach EC 6 (DIN EN 1996-2/NA). *Mauerwerk*, 19. Jg. (3), S. 175–182.
- Althaus, C.; Kiermeier, P.; Schuppler, E., 1991: *Empfehlungen zur Fassadenbegrünung an öffentlichen Bauwerken*. Düsseldorf. Düsseldorf.
- Amir, A.; Kato, Yasuo; Katsurayama, Hiroshi; Koganei, Makoto; Mizunuma, Makoto, 2018: Effects of convection heat transfer on Sunagoke moss green roof: A laboratory study. *Energy and Buildings*, 158. Jg., S. 1417–1428.
- Amstler, Katharina, 2011: *Klimatologische-statistische Bearbeitung von Tornadoereignissen in Europa*. Diplomarbeit. Wien, Universität Wien.
- Anderson, Malcolm; Lambrinos, John; Schroll, Erin, 2010: The potential value of mosses for stormwater management in urban environments. *Urban Ecosystems*, 13. Jg. (3), S. 319–332.
- Ascione, Fabrizio; Bianco, Nicola; de' Rossi, Filippo; Turni, Gianluca; Vanoli, Giuseppe Peter, 2013: Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? *Applied Energy*, 104. Jg., S. 845–859.
- Bach, Claudia; Birkmann, Jörn; Kropp, Jürgen; Olonscheck, Mady; Setiadi, Neysa; Vollmer, Maike; Walther, Carsten, 2013: *Abschätzung der Verwundbarkeit von Bevölkerung und Kritischen Infrastrukturen gegenüber Hitzewellen und Starkregen*. 09. Auflage. Praxis im Bevölkerungsschutz, Bd. 11. Bonn.
- Badr, Amani; Fuchs, Matthias; Stark, Thomas; Zeumer, Martin, 2018: *Nachhaltigkeit gestalten*. München.
- Bartfelder, Friedrich; Köhler, Manfred, 1987: *Experimentelle Untersuchungen zur Funktion von Fassadenbegrünungen*. Dissertation. Berlin, Technische Universität Berlin.
- Bates, Jeffrey W., 1990: Bryophytes and nutrient cycling. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 104. Jg. (1-3), S. 129–147. Zugriff: <https://academic.oup.com/botlinnean/article-pdf/104/1-3/129/14078585/j.1095-8339.1990.tb02215.x.pdf>.
- BBSR – Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (Hrsg.), 2018<sup>a</sup>: *Starkregeneinflüsse auf die bauliche Infrastruktur*. Ein Projekt des Forschungsprogrammes Zukunft Bau des Bundesministeriums für

- Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) durchgeführt vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Bonn.
- BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2018b: Leitfaden Starkregen. Objektschutz und bauliche Vorsorge. Bonn.
- BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2019<sup>a</sup>: Grün in der Stadt. Maßnahmen zur Grün- und Freiraumentwicklung im Rahmen der Städtebauförderung. 2018. Auflage. BBSR-Online-Publikation, 2019, Nr. 12. Bonn.
- BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2019b: Urbane Freiräume. Qualifizierung, Rückgewinnung und Sicherung urbaner Frei- und Grünräume : Handlungsempfehlungen für die kommunale Praxis. 2018. Auflage. Bonn.
- Beckett, K. Paul; Freer-Smith, P. H.; Taylor, Gail, 2000: Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global Change Biology*, 6. Jg. (8), S. 995–1003.
- Bernays, Elizabeth; Graham, Michelle, 1988: On the Evolution of Host Specificity in Phytophagous Arthropods. *Ecology*, 69. Jg. (4), S. 886–892.
- Besir, Ahmet B.; Cuce, Erdem, 2018: Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82. Jg., S. 915–939.
- Blievernicht, Armin; Zander, Matthias; Ulrichs, Christian, 2015: Methoden, Verfahren und erzielte Ergebnisse des Vorhabens. zur Studie: „Neue einheimische Zierpflanzen und Gehölze durch Nutzung der biologischen Vielfalt: Begrünung von extremen Standorten durch einheimische Pflanzen mit großer Toleranz gegenüber urbanen Stressoren“. Berlin, Projekt-Nr.: 314-06.01-2813BM040.
- BMI – Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2018a: Hochwasserschutzfibel. Objektschutz und bauliche Vorsorge. 8. Auflage. Berlin.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.), 2016<sup>a</sup>: Anpassung an den Klimawandel. Erster Fortschrittsbericht der Bundesregierung zur Deutschen Anpassungsstrategie.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Steckbrief Kriterium 4.1.4.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016b: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Außenanlagen.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016c: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Steckbrief Kriterium 1.1.4.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2017: Weißbuch Stadtgrün. Grün in der Stadt - für eine lebenswerte Zukunft. 2017. Auflage. Berlin.
- Bosch, Jordi; Retana, Javier; Cerdá, Xim, 1997: Flowering phenology, floral traits and pollinator composition in a herbaceous Mediterranean plant community. *Oecologia*, 109. Jg. (4), S. 583–591.
- Bowler, Diana E.; Buyung-Ali, Lisette; Knight, Teri M.; Pullin, Andrew S., 2010: Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97. Jg. (3), S. 147–155. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204610001234>.
- Brand, Fridolin; Hoheisel, Deborah; Kirchoff, Thomas, 2011: Der Resilienz-Ansatz auf dem Prüfstand: Herausforderungen, Probleme, Perspektiven. Laufen.
- Brune, Miriam; Bender, Steffen; Groth, Markus, 2017: Gebäudebegrünung und Klimawandel. Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Report, Bd. 30. Hamburg.

- Butler, Colleen; Butler, Erin; Orians, Colin M., 2012: Native plant enthusiasm reaches new heights: Perceptions, evidence, and the future of green roofs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11. Jg. (1), S. 1–10.
- Buxbaum, Iris; Nagl, Christian; Spangl, Wolfgang, 2018: Analyse der Feinstaub-Belastung 2009-2017. Im Auftrag der Plattform Saubere Luft. Report / Umweltbundesamt.
- Castleton, H. F.; Stovin, V.; Beck, S.B.M.; Davison, J. B., 2010: Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42. Jg. (10), S. 1582–1591. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810001453>.
- Catalano, Chiara; Laudicina, Vito Armando; Badalucco, Luigi; Guarino, Riccardo, 2018: Some European green roof norms and guidelines through the lens of biodiversity: Do ecoregions and plant traits also matter? *Ecological Engineering*, 115. Jg., S. 15–26.
- Chambers, Robert, 1989: Editorial Introduction: Vulnerability, Coping and Policy. *IDS Bulletin*, 20. Jg. (2), S. 1–7.
- Clemants, Steven E.; Moore, Gerry, 2003: Patterns of Species Diversity in Eight Northeastern United States Cities. *Urban Habitats*, 1. Jg. (1), S. 1–13. Zugriff: [http://urbanhabitats.org/v01n01/speciesdiversity\\_full.html](http://urbanhabitats.org/v01n01/speciesdiversity_full.html).
- Coronese, Matteo; Lamperti, Francesco; Keller, Klaus; Chiaromonte, Francesca; Roventini, Andrea, 2019: Evidence for sharp increase in the economic damages of extreme natural disasters. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116. Jg. (43), S. 21450–21455.
- Cuce, Erdem, 2017: Thermal regulation impact of green walls: An experimental and numerical investigation. *Applied Energy*, 194. Jg., S. 247–254. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916313824>.
- David, Werner (Hrsg.), 2018: *Lebensraum Totholz. Gestaltung und Naturschutz im Garten*. 3. Auflage. Darmstadt.
- Dawson, Todd E., 1993: Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia*, 95. Jg. (4), S. 565–574. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/BF00317442>.
- Della-Marta, Paul M.; Pinto, Joaquim G., 2009: Statistical uncertainty of changes in winter storms over the North Atlantic and Europe in an ensemble of transient climate simulations. *Geophysical Research Letters*, 36. Jg. (14), L20202.
- Dettmar, J.; Pfoser, Nicole; Sieber, Sandra, 2016: Gutachten Fassadenbegrünung. Vorschlag für Zweck, Umfang und Gebietskulisse einer finanziellen Förderung von quartiersorientierten Unterstützungsansätzen von Fassadenbegrünungen für das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKUNLV) NRW.
- Deutsche Wildtier Stiftung, 2019: Fachliche Anforderungen an Dachbegrünungen aus Sicht des Wildbienen-schutzes. Ein Projekt zum Schutz und zur Förderung von Wildbienen. Hamburg.
- Diaz, S.; Settele, Josef; Brondízio, Eduardo; Ngo, Hien T.; Guèze, Maximilien; Agard, John; Arneth, Almut; Balvanera, Patricia; Brauman, Kate; Butchart, Stuart; Chan, Kai; Garibaldi, Lucas; Ichii, Kazuhito; Liu, Jianguo; Subramanian, Suneetha Mazhenchery; Midgley, Guy; Miloslavich, Patricia; Molnár, Zsolt; Obura, David; Pfaff, Alexander; Polasky, Stephen; Purvis, Andy; Razzaque, Jona; Reyers, Belinda; Chowdury, Rinku Roy; Shin, Yunne-Jai; Visseren-Hamakers, Ingrid; Willis, Katherine; Zayas, Cynthia, 2019: Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.

- Donat, M. G.; Leckebusch, G. C.; Wild, S.; Ulbrich, U., 2011: Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11. Jg. (5), S. 1351–1370. Zugriff: <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/1351/2011/>.
- Dorn-Pfahler, Sabine; Stritter, Jessica, 2017: Nachhaltiges Bauen des Bundes. Grundlagen Methoden Werkzeuge. 2017. Auflage. Schriftenreihe Zukunft Bauen, Band 08.
- Dotzek, N., 2005: Tornado und Downburstklimatologie. In: Klimastatusbericht 2004. Offenbach am Main, S. 171-180.
- Drake, Paige; Grimshaw-Surette, Hughstin; Heim, Amy; Lundholm, Jeremy, 2018: Mosses inhibit germination of vascular plants on an extensive green roof. *Ecological Engineering*, 117. Jg., S. 111–114.
- Durka, Walter; Michalski, Stefan G.; Berendzen, Kenneth W.; Bossdorf, Oliver; Bucharova, Anna; Hermann, Julia-Maria; Hölzel, Norbert; Kollmann, Johannes, 2017: Genetic differentiation within multiple common grassland plants supports seed transfer zones for ecological restoration. *Journal of Applied Ecology*, 54. Jg. (1), S. 116–126.
- Dvorak, Bruce; Volder, Astrid, 2010: Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 96. Jg. (4), S. 197–213. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204610000782>.
- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 2016: Merkblatt DWA-M 553. Hochwasserangepasstes Planen und Bauen. Hennef.
- DWD – Deutscher Wetterdienst, 2016<sup>a</sup>: Klimastatusbericht 2016. Offenbach. Zugriff: [www.ksb.dwd.de](http://www.ksb.dwd.de) [abgerufen am 11. 09. 2018].
- DWD – Deutscher Wetterdienst, 2016<sup>b</sup>: Starkniederschläge in Deutschland. Offenbach am Main, Deutschland.
- DWD – Deutscher Wetterdienst, 2018: Aktuelles Netz aus Stationen mit stündlichen Winddaten des Nationalen Klimadatenzentrums. Zugriff: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mnetzkarten/messnetz\\_ff.pdf;jsessionid=8AD0893C20895557277930COD658D851.live21064?\\_blob=publicationFile&v=11](https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mnetzkarten/messnetz_ff.pdf;jsessionid=8AD0893C20895557277930COD658D851.live21064?_blob=publicationFile&v=11) [abgerufen am 19. 10. 2018].
- Dzierzanowski, Kajetan; Popek, Robert; Gawrońska, Helena; Saebø, Arne; Gawroński, Stanislaw W., 2011: Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. *International journal of phytoremediation*, 13. Jg. (10), S. 1037–1046.
- Egli, T.; Stucki, M., 2007: Elementarschutzregister Hagel. Untersuchungen zur Hagelgefahr und zum Widerstand der Gebäudehülle. Synthesebericht. Bern.
- Egli, Thomas, 2007: Wegleitung - Objektschutz gegen meteorologische Naturgefahren. Bern. Zugriff: [https://www.hagelregister.ch/files/Downloads/Downloads\\_DE/Hagel/Planungshinweise\\_Hagel\\_d.pdf](https://www.hagelregister.ch/files/Downloads/Downloads_DE/Hagel/Planungshinweise_Hagel_d.pdf) [abgerufen am 15. 10. 2018].
- Ellenberg, Heinz; Dierschke, Hartmut, 2010: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht ; 203 Tabellen. 6. Auflage. UTB Botanik, Ökologie, Agrar- und Forstwissenschaften, Geographie, Bd. 8104. Stuttgart.
- Fahrion, Marc-Steffen, 2015: Sommerlicher Wärmeschutz im Zeichen des Klimawandels. Anpassungsplanung für Bürogebäude. Dissertation. Dresden, Technische Universität.
- Fendler, Roland, 2018: WG: Aktion: Klimaänderungsfaktor. E-Mail, 30. Oktober. Dessau-Roßlau.

- Finck, P.; Heinze, S.; Raths, U.; Riecken, U.; Ssymank, A., 2017: Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands. : dritte fortgeschriebene Fassung 2017., Heft 156, S. 1–637.
- Flohr, Sabine, 2011: Untersuchungen zum Fangvermögen von Mittel- und Feinstaub (PM10 und PM2.5) an ausgesuchten Pflanzenarten unter Berücksichtigung der morphologischen Beschaffenheit der Blatt- und Achsenoberflächen und der Einwirkung von Staubaufgaben auf die Lichtreaktion der Photosynthese. PhD-Thesis.
- Francis, Lotte Fjendbo Møller; Jensen, Marina Bergen, 2017: Benefits of green roofs: A systematic review of the evidence for three ecosystem services. *Urban Forestry & Urban Greening*, 28. Jg., S. 167–176.
- Francis, Robert A.; Lorimer, Jamie, 2011: Urban reconciliation ecology: the potential of living roofs and walls. *Journal of environmental management*, 92. Jg. (6), S. 1429–1437.
- Francis, Robert A.; Lorimer, Jamie; Raco, Mike, 2012: Urban ecosystems as 'natural' homes for biogeographical boundary crossings. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 37. Jg. (2), S. 183–190.
- Fulthorpe, Roberta; MacIvor, J. Scott; Jia, Pu; Yasui, Simone-Louise E., 2018: The Green Roof Microbiome: Improving Plant Survival for Ecosystem Service Delivery. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6. Jg., S. 770.
- FVHF – Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V., 2017: FVHF Leitlinie. Planung und Ausführung von Vorgehängten Hinterlüfteten Fassaden (VHF). Berlin.
- Gerhardt, H. J.; Janser, F.; Kramer, C. (Hrsg.), 1995: Windbeanspruchung belüfteter Außenwände. *WiG-Berichte*, Bd. 4.
- Gibson, Michelle R.; Pauw, Anton; Richardson, David M., 2013: Decreased insect visitation to a native species caused by an invasive tree in the Cape Floristic Region. *Biological Conservation*, 157. Jg., S. 196–203.
- Gigla, Birger, 2015: Zweischaliges Verblendmauerwerk. In: Jäger, Wolfram (Hrsg.): *Mauerwerk-Kalender 2015. Bemessung, Bauen im Bestand*. 40. Auflage. *Mauerwerk-Kalender (VCH) \**. Berlin, S. 263–291.
- Goderbauer-Marchner, Gabriele; Sontheimer, Rainer, 2015: Die unterschätzten Risiken Starkregen und Sturzfluten. Ein Handbuch für Bürger und Kommunen. Bonn.
- Griebel, Norbert, 2017: *Mein ungezähmter Garten. Die 100 besten heimischen Pflanzen zum Verwildern*. Haupt Natur.
- Groenemeijer, Pieter; Kühne, Thilo, 2014: A Climatology of Tornadoes in Europe: Results from the European Severe Weather Database. *Monthly Weather Review*, 142. Jg. (12), S. 4775–4790.
- Gromke, C.; Ruck, B., 2008: Aerodynamic modelling of trees for small-scale wind tunnel studies. *Forestry*, 81. Jg. (3), S. 243–258.
- Grote, Rüdiger; Samson, Roeland; Alonso, Rocío; Amorim, Jorge Humberto; Cariñanos, Paloma; Churkina, Galina; Fares, Silvano; Le Thiec, Didier; Niinemets, Ülo; Mikkelsen, Teis Norgaard; Paoletti, Elena; Tiwary, Abhishek; Calfapietra, Carlo, 2016: Functional traits of urban trees: air pollution mitigation potential. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14. Jg. (10), S. 543–550.
- Günzel, Wolf Richard, 2010: *Lebensräume schaffen. Wildtiere in Haus und Garten*. 2. Auflage. Darmstadt.
- Haberlandt, Uwe; Belli, Aslan; Hölscher, Joseph, 2010: Trends in beobachteten Zeitreihen von Temperatur und Niederschlag in Niedersachsen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 54. Jg. (1), S. 28–36.

- Hallmann, Caspar A.; Sorg, Martin; Jongejans, Eelke; Siepel, Henk; Hofland, Nick; Schwan, Heinz; Stenmans, Werner; Müller, Andreas; Sumser, Hubert; Hörren, Thomas; Goulson, Dave; Kroon, Hans de, 2017: More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS one*, 12. Jg. (10), e0185809.
- Hansen, Rieke; Born, Dennis, 2018: Grüne Infrastruktur im urbanen Raum: Grundlagen, Planung und Umsetzung in der integrierten Stadtentwicklung. Abschlussbericht zum F+E-Vorhaben "Grüne Infrastruktur im urbanen Raum: Grundlagen, Planung und Umsetzung in der integrierten Stadtentwicklung" (FKZ 3515 82 0800). BfN-Skripten, Bd. 503. Bonn - Bad Godesberg.
- Hassol, Susan Joy; Torok, Simon; Lewis, Sophie; Luganda, Patrick, 2016: (Un)Natural Disasters: Communicating Linkages Between Extreme Events and Climate Change. *WMO Bulletin - The journal of the World Meteorological Organization*, 65. Jg. (2), S. 2-9.
- Hattermann, Fred F.; Kundzewicz, Zbigniew W.; Huang, Shaochun; Vetter, Tobias; Gerstengarbe, Friedrich-Wilhelm; Werner, Peter, 2013: Climatological drivers of changes in flood hazard in Germany. *Acta Geophysica*, 61. Jg. (2), S. 463-477. Zugriff: <https://doi.org/10.2478/s11600-012-0070-4>.
- Hatzfeld, Fritz; Kurz, Susanne, 2010: Klimaangepasstes Bauen - Kriterienstreckbrief Widerstandsfähigkeit gegen Naturgefahren: Wind, Starkregen, Hagel, Schnee/feuchte Winter und Hochwasser. Endbericht. Aachen.
- Häupl, Peter; Höfker, Gerrit; Homann, Martin; Kölzow, Christian; Maas, Anton; Nocke, Christian; Riese, Olaf; Willems, Wolfgang M. (Hrsg.), 2017: Lehrbuch der Bauphysik: Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima. 8. Auflage. Wiesbaden.
- Heim, Amy; Lundholm, Jeremy, 2014: Species interactions in green roof vegetation suggest complementary planting mixtures. *Landscape and Urban Planning*, 130. Jg., S. 125-133.
- Heim, Amy; Lundholm, Jeremy; Philip, Leanne, 2014: The impact of mosses on the growth of neighbouring vascular plants, substrate temperature and evapotranspiration on an extensive green roof. *Urban Ecosystems*, 17. Jg. (4), S. 1119-1133. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/s11252-014-0367-y>.
- Hemmrich, Edith; Blaschitz, Mark; Wurm, Jan, 2014: The algae house - about the first building with a bioreactor façade. [on the occasion of the 14th International Architecture Biennale of Venice 2014].
- Hestermann, Ulf; Rongen, Ludwig, 2018: Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 2. 35. Auflage. Wiesbaden.
- Hestermann, Ulf; Rongen, Ludwig; Frick, Otto; Knöll, Karl; Dahlem, Karl-Heinz; Feist, Wolfgang; Richter, Thomas; Kieser, Andreas, 2015: Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1. 36. Auflage. Praxis. Wiesbaden.
- Hillebrandt, Annette; Riegler-Floors, Petra; Rosen, Anja; Seggewies, Johanna-Katharina, 2018: Atlas Recycling. Gebäude als Materialressource. München.
- Himmelhuber, Peter, 2013: Wasser im Garten. Naturnahe Teiche, Bachläufe und Badestellen selbst bauen. Staufen bei Freiburg.
- Hobbs, Richard J.; Arico, Salvatore; Aronson, James; Baron, Jill S.; Bridgewater, Peter; Cramer, Viki A.; Epstein, Paul R.; Ewel, John J.; Klink, Carlos A.; Lugo, Ariel E.; Norton, David; Ojima, Dennis; Richardson, David M.; Sanderson, Eric W.; Valladares, Fernando; Vila, Montserrat; Zamora, Regino; Zobel, Martin, 2006: Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order. *Global Ecology and Biogeography*, 15. Jg. (1), S. 1-7.
- Hobbs, Richard J.; Norton, David A., 1996: Towards a Conceptual Framework for Restoration Ecology. *Restoration Ecology*, 4. Jg. (2), S. 93-110.
- Hoffmann, Peter, 2009: Modifikation von Starkniederschlägen durch urbane Gebiete. Diplomarbeit. Hamburg, Universität Hamburg.

- Holling, C. S., 1973: Resilience and Stability of Ecological Systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 4. Jg., S. 1–23. Zugriff: <http://www.jstor.org/stable/2096802>.
- HolzLand GmbH, 2013: Holzterrassen. Technisches Handbuch. Dortmund. Zugriff: [http://www.tirol.at/fileadmin/user\\_upload/downloads/Technisches\\_Handbuch\\_Terrassen.pdf](http://www.tirol.at/fileadmin/user_upload/downloads/Technisches_Handbuch_Terrassen.pdf).
- Höppe, P., 1999: The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology, 43. Jg. (2), S. 71–75.
- Hübener, Heike; Bülow, Katharina; Fooker, Cornelia; Früh, Barbara; Hoffmann, Peter; Höpp, Simona; Keuler, Klaus; Menz, Christoph; Mohr, Viktoria; Radtke, Kai; Ramthun, Hans; Spekat, Arne; Steger, Christian; Toussaint, Frank; Warrach-Sagi, Kirsten; Woldt, Michael, 2017: ReKliEs-De Ergebnisbericht.
- Hupfer, Peter; Kuttler, Wilhelm; Heyer, Ernst (Hrsg.), 2005: Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 11. Auflage. Stuttgart.
- IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie, 2018: Passivhaus-Bauteilkatalog: Neubau. Ökologisch bewertete Konstruktionen. 4. Auflage. Basel.
- Ichii, Kazuhito; Molnár, Zsolt; Obura, David; Purvis, Andy; Willis, Katherine, 2019: IPBES Global Assessment on Biodiversity and Ecosystem Services. Chapter 2.2 Status and Trends - Nature. Paris.
- INTEP, 2018: KLIBAU - Klima- und Umweltpotentiale von Gebäuden. Abschlussbericht.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000: Emissions scenarios. Summary for policymakers; a special report of IPCC Working Group III. IPCC special report. Genf.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014<sup>a</sup>: Klimaänderung 2014. Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016. Genf, Schweiz. Zugriff: [https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC-AR5\\_SYR\\_barrierefrei.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf) [abgerufen am 13. 09. 2018].
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014b: Summary for policymakers. In: Field, C. B.; Barros, V. R.; Dokken, D. J.; Mach, K. J.; Mastrandrea, M. D.; Bilir, T. E.; Chatterjee, M.; Ebi, K. L.; Estrada, Y. O.; Genova, R. C.; Girma, B.; Kissel, E. S.; Levy, A. N.; MacCracken, S.; Mastrandrea, P. R.; White L.L. (Hrsg.): Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, S. 1–32.
- IUCN – International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 2014: Species Survival Commission guidelines on the use of ex situ management for species conservation. Gland, Switzerland.
- Jacob, Daniela; Petersen, Juliane; Eggert, Bastian; Alias, Antoinette; Christensen, Ole Bøssing; Bower, Laurens M.; Braun, Alain; Colette, Augustin; Déqué, Michel; Georgievski, Goran; Georgopoulou, Elena; Gobiet, Andreas; Menut, Laurent; Nikulin, Grigory; Haensler, Andreas; Hempelmann, Nils; Jones, Colin; Keuler, Klaus; Kovats, Sari; Kröner, Nico; Kotlarski, Sven; Kriegsmann, Arne; Martin, Eric; van Meijgaard, Erik; Moseley, Christopher; Pfeifer, Susanne; Preuschmann, Swantje; Radermacher, Christine; Radtke, Kai; Rechid, Diana; Rounsevell, Mark; Samuelsson, Patrick; Somot, Samuel; Soussana, Jean-Francois; Teichmann, Claas; Valentini, Riccardo; Vautard, Robert; Weber, Björn; Yiou, Pascal, 2014: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Regional Environmental Change, 14. Jg. (2), S. 563–578.
- Jaffal, Issa; Ouldboukhite, Salah-Eddine; Belarbi, Rafik, 2012: A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. Renewable Energy, 43. Jg., S. 157–164.



- Janhäll, Sara, 2015: Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105. Jg., S. 130–137.
- John, Jesse; Kernaghan, Gavin; Lundholm, Jeremy, 2017: The potential for mycorrhizae to improve green roof function. *Urban Ecosystems*, 20. Jg. (1), S. 113–127.
- Jolk, Anna-Kristin; Peters, Marco; Willen, Luise, 2017: Praxisratgeber Klimagerechtes Bauen. Mehr Sicherheit und Wohnqualität bei Neubau und Sanierung. Köln.
- Jones, P. D.; Horton, E. B.; Folland, C. K.; Hulme, M.; Parker, D. E.; Basnett, T. A., 1999: The Use of Indices to Identify Changes in Climatic Extremes. *Climatic Change*, 42. Jg. (1), S. 131–149. Zugriff: <https://doi.org/10.1023/A:1005468316392>.
- Junghänel, Thomas; Ertel, Heinz; Deuschländer, Thomas, 2017: KOSTRA-DWD-2010R. Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010. Offenbach am Main.
- Kabisch, Nadja; Korn, Horst; Stadler, Jutta; Bonn, Aletta (Hrsg.), 2017: Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas. Linkages between science, policy and practice. Theory and practice of urban sustainability transitions. Cham, Switzerland.
- Kinlock, Nicole L.; Schindler, Bracha Y.; Gurevitch, Jessica, 2016: Biological invasions in the context of green roofs. *Israel Journal of Ecology & Evolution*, 62. Jg. (1-2), S. 32–43.
- Klawa, M.; Ulbrich, U., 2003: A model for the estimation of storm losses and the identification of severe winter storms in Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3. Jg. (6), S. 725–732. Zugriff: <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/3/725/2003/>.
- KLIWA – Kooperation Klimaveränderung und Wasserwirtschaft, 2016: Klimawandel in Süddeutschland. Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA - Monitoringbericht 2016. Zugriff: [https://www.kliwa.de/\\_download/KLIWA\\_Monitoringbericht\\_2016.pdf](https://www.kliwa.de/_download/KLIWA_Monitoringbericht_2016.pdf) [abgerufen am 13. 09. 2018].
- Köhler, Manfred, 1993: Fassaden- und Dachbegrünung. 34 Tabellen. Stuttgart.
- Köhler, Manfred; Nistor, Cristian Rares, 2018: Wandgebundene Begrünungen. Quantifizierungen einer neuen Bauweise in der Klima-Architektur. FLL-Schriftenreihe Forschungsvorhaben, Bd. 2015,01. Bonn.
- Kokogiannakis, Georgios; Darkwa, Jo; Badeka, Sofia; Li, Yilin, 2019: Experimental comparison of green facades with outdoor test cells during a hot humid season. *Energy and Buildings*, 185. Jg., S. 196–209.
- Köppke, Karl-Erich; Sterger, Olaf; Stock, Manfred; Selbmann, Bernhard, 2012: Grundlagen für die Technische Regel für Anlagensicherheit (TRAS) 310: Vorkkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser. Dessau-Roßlau. Zugriff: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/4447.html> [abgerufen am 29. 10. 2018].
- Kowarik, Ingo, 2011: Novel urban ecosystems, biodiversity, and conservation. *Environmental pollution* (Barking, Essex : 1987), 159. Jg. (8-9), S. 1974–1983.
- Kowarik, Ingo; Bartz, Robert; Cloos, Ingrid, 2012: Berliner Strategie zur Biologischen Vielfalt. Begründung, Themenfelder und strategische Ziele. Berlin. Zugriff: [https://www.berlin.de/senuvk/natur\\_gruen/naturschutz/downloads/publikationen/biologische\\_vielfalt\\_strategie.pdf](https://www.berlin.de/senuvk/natur_gruen/naturschutz/downloads/publikationen/biologische_vielfalt_strategie.pdf).
- Kray, Thorsten; Hunke, Fabian (Hrsg.), 2011: Windlasten an Flachdach-Photovoltaikanlagen. *WtG-Berichte*, Bd. 12.

- Krispel, Stefan; Peyerl, Martin; Weihs, Philipp; Maier, Gerald, 2017: Urban Heat Islands – Reduktion von innerstädtischen Wärmeinseln durch Whitetopping. *Bauphysik*, 39. Jg. (1), S. 33–40.
- Krus, Martin, 1995: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation. Stuttgart, Universität Stuttgart.
- Kühn, Ingolf; Brandl, Roland; Klotz, Stefan, 2004: The flora of German cities is naturally species rich. *Evolutionary Ecology Research*, 6. Jg. (5), S. 749–764. Zugriff: <http://www.Evolutionary-Ecology.com/issues/v06n05/ijar1629.pdf>.
- Kunz, M.; Sander, J.; Kottmeier, Ch., 2009: Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. *International Journal of Climatology*, 29. Jg. (15), S. 2283–2297.
- Lakatos, Michael, 2011: Lichens and Bryophytes: Habitats and Species. In: Lüttge, Ulrich; Beck, Erwin; Bartels, Dorothea (Hrsg.): *Plant Desiccation Tolerance*. Ecological Studies. Berlin, S. 65–87.
- Lakatos, Michael; Strieth, Dorina, 2018: Terrestrial Microalgae: Novel Concepts for Biotechnology and Applications. In: Cánovas, Francisco M.; Lüttge, Ulrich; Matyssek, Rainer (Hrsg.): *Progress in Botany* Vol. 79. Progress in Botany. Cham, S. 269–312.
- LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), 2016: Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen. Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen 2016. LANUV-Fachbericht. Recklinghausen.
- LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2010: Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS). Veränderung in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter Ereignisse und Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit. Recklinghausen.
- Larson, D. W.; Matthes, U.; Kelly, P. E.; Lundholm, J. T.; Gerrath, J. A., 2004: The urban cliff revolution: new findings on the origins and evolution of human habitats. Markham, Canada.
- Lateltin, Olivier; Jordi, Martin, 2008: Hagel - Die unterschätzte Gefahr. *Schadenprisma*, (4), S. 7–11. Zugriff: [https://www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/pdf/2008/sp\\_2008\\_4\\_2.pdf](https://www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/pdf/2008/sp_2008_4_2.pdf).
- LAU – Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, 2016: Klimaanalyse Sachsen-Anhalt für den Zeitraum 1951-2014 auf Basis von Beobachtungsdaten. Halle (Saale).
- LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, 2010: Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten. Beschlossen auf der 139. LAWA-VV am 25./26. März 2010 in Dresden. Zugriff: [http://www.lawa.de/documents/HWGK15062010\\_b72.pdf](http://www.lawa.de/documents/HWGK15062010_b72.pdf) [abgerufen am 6. 12. 2018].
- LFU – Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2005: Klimaänderungsfaktoren bei Planungen für den Hochwasserschutz. Sonderbericht. Zugriff: [https://www.lfu.bayern.de/wasser/gewaesserkundliche\\_berichte/sonderberichte/doc/sb\\_klimaaenderungsfaktoren\\_bei\\_planung\\_hwschutz.pdf](https://www.lfu.bayern.de/wasser/gewaesserkundliche_berichte/sonderberichte/doc/sb_klimaaenderungsfaktoren_bei_planung_hwschutz.pdf), Gewässerkundlicher Jahresbericht für Bayern [abgerufen am 18. 10. 2018].
- Lohmeyer, Gottfried; Ebeling, Karsten, 2018: Weiße Wannen - einfach und sicher. Planung und Konstruktion wasserundurchlässiger Bauwerke aus Beton. 11. Auflage. Edition Beton. Erkrath.
- Lotze-Campen, Hermann; Claussen, Lars; Dosch, Alex; Noleppa, Steffen; Rock, Joachim; Schuler, Johannes; Uckert, Götz, o.J.: Klimawandel und Kulturlandschaft Berlin. Berlin. Zugriff: [https://www.berlin.de/senuvk/umwelt/landschaftsplanung/klimawandel/download/klimawandel\\_kulturlandschaft\\_endbericht.pdf](https://www.berlin.de/senuvk/umwelt/landschaftsplanung/klimawandel/download/klimawandel_kulturlandschaft_endbericht.pdf) [abgerufen am 17. 10. 2018].

- LUBW – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.), 2005: Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes. Leitfaden. Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, Bd. 92. Karlsruhe.
- LUBW – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.), 2013: Zukünftige Klimaentwicklungen in Baden-Württemberg. Perspektiven aus regionalen Klimamodellen. Karlsruhe.
- Lundholm, Jeremy T., 2015: Green roof plant species diversity improves ecosystem multifunctionality. *Journal of Applied Ecology*, 52. Jg. (3), S. 726–734.
- Lundholm, Jeremy; MacIvor, J. Scott; Macdougall, Zachary; Ranalli, Melissa, 2010: Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions. *PloS one*, 5. Jg. (3).
- Lundholm, Jeremy; Tran, Stephanie; Gebert, Luke, 2015: Plant functional traits predict green roof ecosystem services. *Environmental science & technology*, 49. Jg. (4), S. 2366–2374.
- MacIvor, J. Scott; Ruttan, Ally; Salehi, Baharak, 2015: Exotics on exotics: Pollen analysis of urban bees visiting *Sedum* on a green roof. *Urban Ecosystems*, 18. Jg. (2), S. 419–430.
- Mann, G., 1996: Faunistische Untersuchungen von drei Dachbegrünungen in Linz. Dachbegrünungen als ökologische Ausgleichsflächen. *Natur- und Umweltschutz*, 18/3. Linz.
- Mann, Gunter; Klinger, Tobias, 2015: Rückhalt, Abflussverzögerung, Speicherung. Regenwasserbewirtschaftung mit Dachbegrünung. *Green Building*, (06), S. 2–5.
- Marsh, Patrick T.; Brooks, Harold E.; Karoly, David J., 2009: Preliminary investigation into the severe thunderstorm environment of Europe simulated by the Community Climate System Model 3. *Atmospheric Research*, 93. Jg. (1-3), S. 607–618.
- Matulla, C.; Schöner, W.; Alexandersson, H.; Storch, H. von; Wang, X. L., 2008: European storminess: late nineteenth century to present. *Climate Dynamics*, 31. Jg. (2-3), S. 125–130.
- McGuire, Krista L.; Payne, Sara G.; Orazi, Giulia; Palmer, Matthew I., 2015: Bacteria and Fungi in Green Roof Ecosystems. In: Sutton, Richard K. (Hrsg.): *Green Roof Ecosystems*. Ecological Studies. Cham, S. 175–191.
- McGuire, Krista L.; Payne, Sara G.; Palmer, Matthew I.; Gillikin, Caitlyn M.; Keefe, Dominique; Kim, Su Jin; Gedallovich, Seren M.; Discenza, Julia; Rangamannar, Ramya; Koshner, Jennifer A.; Massmann, Audrey L.; Orazi, Giulia; Essene, Adam; Leff, Jonathan W.; Fierer, Noah, 2013: Digging the New York City Skyline: soil fungal communities in green roofs and city parks. *PloS one*, 8. Jg. (3), e58020.
- Meinke, Insa; Weiße, Ralf; Storch, Hans von, 2011: Regionale Klimaszenarien in der Praxis. Beispiel deutsche Ostseeküste. Geesthacht. Zugriff: [https://www.eskp.de/fileadmin/eskp/publikationen/klimawandel/hzg\\_Factsheet\\_Ostsee.pdf](https://www.eskp.de/fileadmin/eskp/publikationen/klimawandel/hzg_Factsheet_Ostsee.pdf) [abgerufen am 17. 10. 2018].
- Minkos, Andrea; Dauert, Ute; Feigenspan, Stefan; Kessinger, Susan, 2018: Luftqualität 2017. Vorläufige Auswertung. Dessau-Roßlau.
- Minkos, Andrea; Dauert, Ute; Feigenspan, Stefan; Kessinger, Susan, 2019: Luftqualität 2018. Vorläufige Auswertung. Dessau-Roßlau.
- Mitchell, M. E.; Hamilton, T. L.; Uebel-Niemeier, C.; Hopfensperger, K. N.; Buffam, I., 2018: Nitrogen cycling players and processes in green roof ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 132. Jg., S. 114–125.
- Morse, D. H., 1971: The Insectivorous Bird as an Adaptive Strategy. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2. Jg. (1), S. 177–200.

- Mudersbach, Christoph, 2016: Ableitung eines Starkregenindex in Abhängigkeit von Jährlichkeit und Regendauer. White Paper.
- Müller, Anette, 2012: Das Sulfatproblem. RECYCLING magazin, (22), S. 26–29.
- Murawski, Aline; Zimmer, Janek; Merz, Bruno, 2016: High spatial and temporal organization of changes in precipitation over Germany for 1951-2006. International Journal of Climatology, 36. Jg. (6), S. 2582–2597.
- Nehring, Stefan (Hrsg.), 2013: Naturschutzfachliche Invasivitätsbewertungen für in Deutschland wild lebende gebietsfremde Gefäßpflanzen. Unter Verwendung von Ergebnissen aus den F+E-Vorhaben FKZ 806 82 330, FKZ 3510 86 0500 und FKZ 3511 86 0300. BfN-Skripten, Bd. 352. Bonn.
- Nehring, Stefan; Skowronek, Sandra, 2017: Die invasiven gebietsfremden Arten der ersten Unionsliste der EU-Verordnung Nr. 1143/2014. Erste Fortschreibung 2017. BfN-Skripten, Bd. 471. Bonn-Bad Godesberg.
- Ng, Edward; Chen, Liang; Wang, Yingna; Yuan, Chao, 2012: A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. Building and Environment, 47. Jg., S. 256–271.
- Nikolowski, Johannes Nils, 2014: Wohngebäude im Klimawandel : Verletzbarkeit und Anpassung am Beispiel von Überflutung und Starkregen. Dissertation. Dresden, Technische Universität.
- NMUEK – Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, 2012: Empfehlung für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Hannover. Zugriff: [www.umwelt.niedersachsen.de/download/69393](http://www.umwelt.niedersachsen.de/download/69393) [abgerufen am 14. 09. 2018].
- Norton, Briony A.; Coutts, Andrew M.; Livesley, Stephen J.; Harris, Richard J.; Hunter, Annie M.; Williams, Nicholas S.G., 2015: Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. Landscape and Urban Planning, 134. Jg., S. 127–138. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204614002503>.
- Nückles, Susanne, 2016: Ökoeffizienzanalyse des TTE-Systems im Vergleich mit einem ausgewählten wasserdurchlässigen Pflasterstein. Masterarbeit. Karlsruhe, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft.
- Oberndorfer, Erica; Lundholm, Jeremy; Bass, Brad; Coffman, Reid R.; Doshi, Hitesh; Dunnett, Nigel; Gaffin, Stuart; Köhler, Manfred; Liu, Karen K. Y.; Rowe, Bradley, 2007: Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. BioScience, 57. Jg. (10), S. 823–833.
- Ondimu, S. N.; Murase, H., 2006: Thermal properties of living roof greening material by inverse modelling. Applied Engineering in Agriculture, 22. Jg. (3), S. 435–441.
- Ondimu, S. N.; Murase, H., 2007: Combining Galerkin Methods and Neural Network Analysis to Inversely determine Thermal Conductivity of Living Green Roof Materials. Biosystems Engineering, 96. Jg. (4), S. 541–550. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511006004132>.
- Otto, Martin; Busch, Stefanie, 2009: ES HagelT - Modellierung der Hagelgefahr in der deutschen Kaskoversicherung. 16. Auflage. Schriftenreihe zu aktuellen Themen der Schadenversicherung. Zugriff: <https://www.es-rueck.de/184423/schriftenreihe-nr-16-es-hagelt.pdf> [abgerufen am 19. 10. 2018].
- Paoletti, Elena; Bardelli, Tommaso; Giovannini, Gianluca; Pecchioli, Leonella, 2011: Air quality impact of an urban park over time. Procedia Environmental Sciences, 4. Jg., S. 10–16.
- Pardow, Alexandra; Hartard, Britta; Lakatos, Michael, 2010: Morphological, photosynthetic and water relations traits underpin the contrasting success of two tropical lichen groups at the interior and edge of forest fragments. AoB PLANTS, 2010. Jg., S. 531.

- Parry, M.L.; Canziani, O.F.; Palutikof, J.P.; van der Linden, P.J.; Hanson, C.E., 2007: Climate Change 2007. Impacts, Adaption and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Patt, Heinz; Jüpner, Robert (Hrsg.), 2013: Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz. 2. Auflage. Berlin.
- Pattantyús-Ábrahám, Margit; Steinbrecht, Wolfgang, 2015: Temperature Trends over Germany from Homogenized Radiosonde Data. *Journal of Climate*, 28. Jg. (14), S. 5699–5715.
- Pérez, Gabriel; Coma, Julià; Martorell, Ingrid; Cabeza, Luisa F., 2014: Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39. Jg., S. 139–165.
- Perini, Katia; Rosasco, Paolo, 2013: Cost–benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, 70. Jg., S. 110–121.
- Petrow, T.; Zimmer, J.; Merz, B., 2009: Changes in the flood hazard in Germany through changing frequency and persistence of circulation patterns. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9. Jg. (4), S. 1409–1423. Zugriff: <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/1409/2009/>.
- PfB GmbH & Co. – Prüfzentrum für Bauelemente KG, 2016: Leitfaden. Empfehlungen für den Einsatz sowie die Ausschreibung von Fenstern und Außentüren nach der Produktnorm DIN EN 14351-1 und DIN 18055. Rosenheim.
- Pfoser, Nicole (Hrsg.), 2016: Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadengestaltung. Darmstadt.
- Pfoser, Nicole, 2018: Vertikale Begrünung: Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit und ohne natürlichen Boden-/Bodenwasseranschluss. Fachbibliothek grün. Stuttgart.
- Pfoser, Nicole; Jenner, Nathalie; Henrich, Johanna; Heusinger, Jannik; Weber, Stephan, 2013: Gebäude Begrünung Energie. Potenziale und Wechselwirkungen. FLL-Schriftenreihe Forschungsvorhaben. Bonn.
- Pinto, J. G.; Fröhlich, E. L.; Leckebusch, G. C.; Ulbrich, U., 2007: Changing European storm loss potentials under modified climate conditions according to ensemble simulations of the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7. Jg. (1), S. 165–175. Zugriff: <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/7/165/2007/>.
- Pinto, Joaquim G.; Neuhaus, Christian P.; Leckebusch, Gregor C.; Reyers, Mark; Kerschgens, Michael, 2010: Estimation of wind storm impacts over Western Germany under future climate conditions using a statistical–dynamical downscaling approach. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 62. Jg. (2), S. 188–201.
- Pisello, Anna; Pignatta, Gloria; Castaldo, Veronica; Cotana, Franco, 2014: Experimental Analysis of Natural Gravel Covering as Cool Roofing and Cool Pavement. *Sustainability*, 6. Jg. (8), S. 4706–4722.
- Plass, Dietrich; Vos, Theo; Hornberg, Claudia; Scheidt-Nave, Christa; Zeeb, Hajo; Krämer, Alexander, 2014: Trends in disease burden in Germany: results, implications and limitations of the Global Burden of Disease study. *Deutsches Arzteblatt international*, 111. Jg. (38), S. 629–638.
- Plöger, Sven; Böttcher, Frank, 2013: Klimafakten. Frankfurt/Main.
- Polak, Paula, 2011: Regenwasser im Garten nachhaltig nutzen. Naturnah planen, bauen und gestalten. Darmstadt.

- Popek, Robert; Gawrońska, Helena; Wrochna, Mariola; Gawroński, Stanisław W.; Saebø, Arne, 2013: Particulate matter on foliage of 13 woody species: deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes—a 3-year study. *International journal of phytoremediation*, 15. Jg. (3), S. 245–256.
- Potts, Simon G., 2016: The assessment report on pollinators, pollination and food production: summary for policymakers. Bonn, Germany.
- Prasse, Rüdiger; Kunzmann, Dierk; Schröder, Roland, 2010: Entwicklung und praktische Umsetzung naturschutzfachlicher Mindestanforderungen an einen Herkunftsnachweis für gebietseigenes Wildpflanzensaatgut krautiger Pflanzen. Abschlussbericht. Hannover.
- Przybysz, A.; Sæbø, A.; Hanslin, H. M.; Gawroński, S. W., 2014: Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. *Science of The Total Environment*, 481. Jg., S. 360–369. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969714002460>.
- Punge, H. J.; Kunz, M., 2016: Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review. *Atmospheric Research*, 176-177, S. 159–184. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809516300291>.
- Puskeiler, Marc, 2013: Radarbasierte Analyse der Hagelgefährdung in Deutschland. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Fak. für Physik, Diss., 2013. *Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher Instituts für Technologie*, Bd. 59. Karlsruhe.
- Pysek, Petr, 1998: Alien and native species in Central European urban floras: a quantitative comparison. *Journal of Biogeography*, 25. Jg. (1), S. 155–163.
- Raji, Babak; Tenpierik, Martin J.; van den Dobbelsteen, Andy, 2015: The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45. Jg., S. 610–623.
- Rauthe, Monika; Kunz, Michael; Kottmeier, Christoph, 2010: Changes in wind gust extremes over Central Europe derived from a small ensemble of high resolution regional climate models. *Meteorologische Zeitschrift*, 19. Jg. (3), S. 299–312.
- Rennwald, Erwin, 2000: Rote Liste der Pflanzengesellschaften Deutschlands mit Anmerkungen zur Gefährdung. *Schriftenreihe für Vegetationskunde*, Heft 35, S. 393–592.
- Reznik, G.; Schmidt, E., 2008: Abscheidung von Feinstaub an Pflanzen bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten. *Chemie Ingenieur Technik*, 80. Jg. (12), S. 1849–1853.
- Richter, Eike; Loidl-Reisch, Cordula; Brix, Karen; Kirstein, Rike; Zelt, Jennifer; Zimmermann, Astrid, 2019: Nachhaltig geplante Außenanlagen. Empfehlungen zu Planung Bau und Bewirtschaftung von Bundesliegenschaften. 2018. Auflage. *Zukunft Bauen*, Band 16.
- Ries, Melanie; Reinhardt, Timm; Nigmann, Ursula; Balzer, Sandra, 2019: Analyse der bundesweiten Roten Listen zum Rückgang der Insekten in Deutschland. *Natur und Landschaft*, 94. Jg. (6/7), S. 236–244.
- Robinson, Alastair; Selkowitz, Stephen, 2013: *Tips for Daylighting with Windows*.
- Roloff, Andreas; Korn, Sandra; Gillner, Sten, 2009: The Climate-Species-Matrix to select tree species for urban habitats considering climate change. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8. Jg. (4), S. 295–308.
- Roth, Ueli, 1980: Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen : Forschungsprojekt BMBau RS II 4 - 704102 - 77.10, Bd. 044. Bonn-Bad Godesberg.
- Ruhnau, Ralf, 2010: Abdichtung mit Bentonit. In: Bonk, Michael (Hrsg.): *Lufsky Bauwerksabdichtung*. Wiesbaden, S. 344–363.

- Ruscheweyh, Hans (Hrsg.), 2009: Windlastminimierung an Photovoltaikanlagen. WtG-Berichte, Bd. 11.
- Ruscheweyh, Hans; Polyzoides, Angela (Hrsg.), 2013: Einfluß des Dachrandabstandes auf die Windlast an Photovoltaikanlagen auf Flachdächern. WtG-Berichte, Bd. 13.
- Ruscheweyh, Hans; Polyzoides, Angela; Geurts, C.P.W.; van Bentum, C. A. (Hrsg.), 2011: Windlasten an kleinen Photovoltaikanlagen. WtG-Berichte, Bd. 12.
- Ruscheweyh, Hans; Windhövel, Reiner (Hrsg.), 2013: Globale horizontale Windlasten an Photovoltaikanlagen auf Flachdächern. WtG-Berichte, Bd. 13.
- Russo, Alessio; Escobedo, Francisco J.; Cirella, Giuseppe T.; Zerbe, Stefan, 2017: Edible green infrastructure: An approach and review of provisioning ecosystem services and disservices in urban environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 242. Jg., S. 53–66. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880917301457>.
- Sæbbø, A.; Popek, R.; Nawrot, B.; Hanslin, H. M.; Gawronska, H.; Gawronski, S. W., 2012: Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of The Total Environment*, 427-428, S. 347–354. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712004883>.
- Sander, Julia, 2010: Extremwetterereignisse im Klimawandel - Bewertung der derzeitigen und zukünftigen Gefährdung. Dissertation. München, Ludwig-Maximilians-Universität.
- Santamouris, M., 2014: Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103. Jg., S. 682–703. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12002447>.
- Scherer, K.; Herrmann, C.; Wahl, M.; Schmidt, T.; Lakatos, M., 2018: Entwicklung von fassadenintegrierten emersen Photobioreaktoren. *Chemie Ingenieur Technik*, 90. Jg. (9), S. 1239.
- Schmauck, Sebastian, 2019: Dach- und Fassadenbegrünung - neue Lebensräume im Siedlungsbereich. Fakten, Argumente und Empfehlungen. BfN-Skripten, Bd. 538. Bonn.
- Schmidt, Marco, 2006: The evapotranspiration of greened roofs and facades. In: Proceedings of the 4. annual international greening rooftops for sustainable communities conference, awards and trade show, Boston, USA, S. 1–10.
- Schmidt, T.; Nguyen, M. K.; Lakatos, M., 2017<sup>a</sup>: Fassadenintegrierte Bioreaktorsysteme. *FASSADE*, 2/2017 (2/2017), S. 24–26.
- Schmidt, T.; Nguyen, M. K.; Lakatos, M., 2017<sup>b</sup>: Phototrophe Mikroorganismen an der Fassade. *FASSADE*, 1/2017 (1/2017), S. 24–26.
- Schmidt, Timo; Herrmann, Carmen; Lakatos, Michael, 2019: Agro-urbane Architektur. In: *DETAIL - Zeitschrift für Architektur + Baudetail*, Bd. 5.2019. München, S. 14–16.
- Schmitt, Theo G., 2017: Ortsbezogene Regenhöhen im Starkregenindexkonzept SRI12 zur Risikokommunikation in der kommunalen Überflutungsvorsorge. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 64. Jg. (4), S. 294–300.
- Schmitt, Theo G.; Krüger, M.; Pfister, A.; Becker, M.; Mudersbach, Christoph; Fuchs, Lothar; Hoppe, Holger; Lakes, I., 2018: Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 65. Jg. (2), S. 113–120.
- Schönwiese, Christian-D.; Janoschitz, Reinhard, 2008: Klima-Trendatlas Deutschland 1901 - 2000. 2. Auflage.
- Schönwiese, Christian-Dietrich, 2013: *Klimatologie*. 31 Tabellen im Text und umfangreicher Tabellenanhang. 4. Auflage. utb-studi-e-book, Bd. 1793. Stuttgart.

- Schröder, Winfried; Pesch, Roland, 2010: Long-term monitoring of the metal accumulation in forests measured by use of the moss technique. *European Journal of Forest Research*, 129. Jg. (3), S. 475–488. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0298-y>.
- Schulz, Holger; Karrasch, Stefan; Bölke, Georg; Cyrus, Josef; Hornberg, Claudia, Pickford, Regina; Schneider, Alexandra; Witt, Christian; Hoffmann, Barbara, 2018: *Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit*. Positionspapier. Berlin.
- Schumann, Andreas, 2012: Welche Jährlichkeit hat das extreme Hochwasser, wenn es als Vielfaches des HQ100 abgeschätzt wird? *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 56. Jg. (2), S. 78–82.
- Schwarzer, Elke, 2019: *Heimische Pflanzen für den Garten. 100 Blumen, Sträucher und Bäume für Biene & Co.* 2. Auflage. Stuttgart (Hohenheim).
- Schwierz, Cornelia; Köllner-Heck, Pamela; Zenklusen Mutter, Evelyn; Bresch, David N.; Vidale, Pier-Luigi; Wild, Martin; Schär, Christoph, 2010: Modelling European winter wind storm losses in current and future climate. *Climatic Change*, 101. Jg. (3), S. 485–514. Zugriff: <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9712-1>.
- Sedlbauer, Klaus; Schunck, Eberhard; Barthel, Rainer; Künzel, Hartwig, 2010: *Flachdach-Atlas. Werkstoffe, Konstruktionen, Nutzungen*. Edition Detail. München.
- Seibold, Sebastian; Gossner, Martin M.; Simons, Nadja K.; Blüthgen, Nico; Müller, Jörg; Ambarlı, Didem; Ammer, Christian; Bauhus, Jürgen; Fischer, Markus; Habel, Jan C.; Linsenmair, Karl Eduard; Naus, Thomas; Penone, Caterina; Prati, Daniel; Schall, Peter; Schulze, Ernst-Detlef; Vogt, Juliane; Wöllauer, Stephan; Weisser, Wolfgang W., 2019: Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature*, 574. Jg. (7780), S. 671–674. Zugriff: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1684-3>.
- Sievers, Uwe; Früh, Barbara, 2012: A practical approach to compute short-wave irradiance interacting with subgrid-scale buildings. *Meteorologische Zeitschrift*, 21. Jg. (4), S. 349–364.
- Skelhorn, Cynthia P.; Levermore, Geoff; Lindley, Sarah J., 2016: Impacts on cooling energy consumption due to the UHI and vegetation changes in Manchester, UK. *Energy and Buildings*, 122. Jg., S. 150–159.
- Smith, Lionel S.; Fellowes, Mark D.E., 2015: The grass-free lawn: Floral performance and management implications. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14. Jg. (3), S. 490–499.
- Snodgrass, Edmund C.; Snodgrass, Lucie L., 2006: *Green roof plants. A resource and planting guide*. Portland.
- Späh, Moritz; Weber, Lutz; Oesterreicher, Timo; Liebl, Andreas, 2011: *Schallschutzpflanzen - Optimierung der Abschirmwirkung von Hecken und Gehölzen*. BWPLUS Schlussberichte, BWU27009. Zugriff: <https://fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/103970/?COMMAND=DisplayBericht&FIS=203&OBJECT=103970&MODE=METADATA>.
- Speak, A. F.; Rothwell, J. J.; Lindley, S. J.; Smith, C. L., 2012: Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. *Atmospheric Environment*, 61. Jg., S. 283–293. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231012007157>.
- Storch, Hans von; Claussen, Martin; KlimaCampus Autoren Team, 2011: *Klimabericht für die Metropolregion Hamburg*. Berlin.
- Storch, Hans von; Meinke, Insa; Claussen, Martin (Hrsg.), 2018: *Hamburger Klimabericht. Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland*. Berlin.



- Stout, Jane C.; Kells, Andrea R.; Goulson, Dave, 2002: Pollination of the invasive exotic shrub *Lupinus arboreus* (Fabaceae) by introduced bees in Tasmania. *Biological Conservation*, 106. Jg. (3), S. 425–434.
- Striffler, Helmut; Heiland, Peter, 2015: Hochwasser-Risiko-bewusst planen und bauen-. *Entwicklungen | Konzepte | Strategien | Instrumente*. Darmstadt.
- Studlar, Susan Moyle; Peck, Jerilynn E., 2009: Extensive Green Roofs and Mosses: Reflections from a Pilot Study in Terra Alta, West Virginia. *Evansia*, 26. Jg. (2), S. 52–63.
- Suzaki, Yuichi; Wakui, Shiro; Iijima, Kentaro, 2004: On the insulating effect and air temperature moderation by *R. ericoides* moss. *Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology*, 30. Jg. (1), S. 56–61.
- Terzaghi, Elisa; Wild, Edward; Zacchello, Gabriele; Cerabolini, Bruno E.L.; Jones, Kevin C.; Di Guardo, Antonio, 2013: Forest Filter Effect: Role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and its associated PAHs. *Atmospheric Environment*, 74. Jg., S. 378–384. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231013002586>.
- Tiwary, A.; Godsmark, K.; Smethurst, J., 2018: Field evaluation of precipitation interception potential of green façades. *Ecological Engineering*, 122. Jg., S. 69–75. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857418302647>.
- Tiwary, Abhishek; Morvan, Hervé P.; Colls, Jeremy J., 2006: Modelling the size-dependent collection efficiency of hedgerows for ambient aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 37. Jg. (8), S. 990–1015. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850205001515>.
- TMUEN – Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz, 2017: Klimawandelfolgen in Thüringen. Monitoringbericht 2017. Erfurt. Zugriff: <https://www.thueringen.de/de/publikationen/pic/pubdownload1708.pdf> [abgerufen am 15. 09. 2018].
- Trapp, Robert J.; Diffenbaugh, Noah S.; Brooks, Harold E.; Baldwin, Michael E.; Robinson, Eric D.; Pal, Jeremy S., 2007: Changes in severe thunderstorm environment frequency during the 21st century caused by anthropogenically enhanced global radiative forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104. Jg. (50), S. 19719–19723.
- UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.), 2015: Monitoringbericht 2015. Zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Dessau-Roßlau.
- Uhlemann, S.; Thieken, A. H.; Merz, B., 2010: A consistent set of trans-basin floods in Germany between 1952–2002. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14. Jg. (7), S. 1277–1295. Zugriff: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/1277/2010/>.
- van Mechelen, Carmen; van Meerbeek, Koenraad; Dutoit, Thierry; Hermy, Martin, 2015: Functional diversity as a framework for novel ecosystem design: The example of extensive green roofs. *Landscape and Urban Planning*, 136. Jg., S. 165–173.
- van Woert, Nicholas D.; Rowe, D. Bradley; Andresen, Jeffrey A.; Rugh, Clayton L.; Fernandez, R. Thomas; Xiao, Lan, 2005: Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of environmental quality*, 34. Jg. (3), S. 1036–1044.
- VGH BW – Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg, 2010: Abwassergebühr für Schmutz- und Niederschlagswasser darf nicht mehr allein nach Wasserverbrauch berechnet werden. Mannheim.
- VKF – Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen, 2018<sup>a</sup>: VKF Prüfbestimmungen Nr. 00a Allgemeiner Teil A. Bern. Zugriff: <https://services.vkg.ch/rest/public/georg/es/publikation/documents/ES PUB-745536923-159.pdf/content> [abgerufen am 29. 10. 2019].

- VKF – Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen, 2018b: VKF Prüfbestimmungen Nr. 00a Allgemeiner Teil B. Bern. Zugriff: <https://services.vkg.ch/rest/public/georg/es/publikation/documents/ESPUB-745536923-384.pdf/content> [abgerufen am 29. 10. 2019].
- Warema Renkhoff SE, 2018: Technik. Raffstoren. Marktheidenfeld.
- WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH, 2015: Hinweise für Bauvorhaben in festgesetzten Überschwemmungsgebieten und in Risikogebieten außerhalb von Überschwemmungsgebieten. Zugriff: [https://www.hochwasser.baden-wuerttemberg.de/documents/43970/44031/Hinweise\\_Bauen\\_in\\_USG.pdf/4417a54b-5f83-4db0-a8b8-98c19d553c40](https://www.hochwasser.baden-wuerttemberg.de/documents/43970/44031/Hinweise_Bauen_in_USG.pdf/4417a54b-5f83-4db0-a8b8-98c19d553c40) [abgerufen am 6. 12. 2018].
- Weber, Frauke; Kowarik, Ingo; Säumel, Ina, 2014: Herbaceous plants as filters: Immobilization of particulates along urban street corridors. *Environmental Pollution*, 186. Jg., S. 234–240. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749113006441>.
- Weerakkody, Udeshika; Dover, John W.; Mitchell, Paul; Reiling, Kevin, 2018: Evaluating the impact of individual leaf traits on atmospheric particulate matter accumulation using natural and synthetic leaves. *Urban Forestry & Urban Greening*, 30. Jg., S. 98–107. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866717305563>.
- Weigelt, Lars, 2017: Gartenpraxis im Klimawandel. München.
- Weisser, Wolfgang W.; Hauck, Thomas E., 2017: ANIMAL-AIDED DESIGN – using a species' life-cycle to improve open space planning and conservation in cities and elsewhere, Bd. 18.
- Weller, Bernhard; Fahrion, Marc-Steffen; Horn, Sebastian; Naumann, Thomas; Nikolowski, Johannes Nils, 2016: Baukonstruktion im Klimawandel. Wiesbaden.
- Weller, Bernhard; Naumann, Thomas; Jakubetz, Sven (Hrsg.), 2012: Gebäude unter den Einwirkungen des Klimawandels. Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM - Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden, H. 3. Berlin.
- Werner, Peter; Zahner, Rudolf, 2009: Biologische Vielfalt und Städte. Eine Übersicht und Bibliographie. BfN-Skripten, Bd. 245. Bonn - Bad Godesberg.
- Westphal, Uwe, 2018: Hecken - Lebensräume in Garten und Landschaft. *Ökologie, Artenvielfalt, Praxis*. 2. Auflage. Darmstadt.
- Westrich, Paul, 1997: Wildbienen am Haus und im Garten. Arbeitsblätter zum Naturschutz, Bd. 22. Karlsruhe.
- Wichura, Bodo, 2019: Klimaprojektionen zur Entwicklung von Böenextrema. Telefonat, 09. April.
- Williams, Nicholas S. G.; Lundholm, Jeremy; Scott MacIvor, J., 2014: FORUM: Do green roofs help urban biodiversity conservation? *Journal of Applied Ecology*, 51. Jg. (6), S. 1643–1649.
- Wittenberg, Rüdiger; Kenis, Marc; Blick, Theo; Hänggi, Ambros; Gassmann, André; Weber, Ewald, 2006: Gebietsfremde Arten in der Schweiz. Eine Übersicht über gebietsfremde Arten und ihre Bedrohung für die biologische Vielfalt und die Wirtschaft in der Schweiz. Bundesamt. Umwelt-Wissen, 0629. Bern. Zugriff: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/publikationen-studien/publikationen/gebietsfremde-arten.html> [abgerufen am 26. 11. 2018].
- Woppowa, Stefan; Odenhausen, Michael, 2014: Unwetterfront "Andreas". 15 Minuten Hagelsturm mit katastrophalen Folgen. Köln. Zugriff: <http://media.genre.com/documents/iipc1404-de.pdf> [abgerufen am 15. 10. 2018].
- Wurm, Jan; Pauli, Martin; Kerner, Martin; Hindersin, Stefan; Krümmel, Stefan; Breckner, Ingrid; Frechen, Matthias; Sengewald, Timo, 2016: Monitoring Fassadenkonstruktion aus Photobioreaktoren am

Pilotprojekt BIQ auf der IBA 2013 in Hamburg. Abschlussbericht. Forschungsinitiative ZukunftBau, F 2996. Stuttgart.

Yang, Jun; Chang, Yamin; Yan, Pengbo, 2015: Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM2.5 pollution. Atmospheric Pollution Research, 6. Jg. (2), S. 267–277. Zugriff: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S130910421530235X>.

Zimmermann, Peter, 1987: Dachbegrünung. Eine ökologische Untersuchung auf Kiesdach, extensiv und intensiv begrünten Dächern. Veröffentlichungen für Naturschutz und Landschaftspflege in Baden-Württemberg, (Band 62).

## 12.2. Normen und Richtlinien

ANSI/ASHRAE 140-2004, 2004: Standard Method Of Test For The Evaluation Of Building Energy Analysis Computer Programs, 2004.

DAfStb – Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2017: DAfStb-Richtlinie: Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie). 2017. Auflage. DAfStb-Richtlinie. Berlin.

DIN 18196:2011-05, 2011: Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.

DIN 18351:2016-09, 2016: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Vorgehängte Hinterlüftete Fassade.

DIN 18515-1:2017-08, 2017: Außenwandbekleidungen - Grundsätze für Planung und Ausführung - Teil 1: Angemörtelte Fliesen oder Platten.

DIN 18516-1:2010-06, 2010: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet - Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze.

DIN 18531-3:2017-07, 2017: Abdichtung von Dächern sowie von Balkonen, Loggien und Laubengängen - Teil 3: Nicht genutzte und genutzte Dächer - Auswahl, Ausführung und Details.

DIN 18533-1:2017-07, 2017: Abdichtung von erdberührten Bauteilen Teil 1: Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze.

DIN 18533-2:2017-07, 2017: Abdichtung von erdberührten Bauteilen - Teil 2: Abdichtung mit bahnenförmigen Abdichtungsstoffen.

DIN 1986-100:2016-12, 2016: Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke -Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056.

DIN 4108-10:2015-12, 2015: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe.

DIN 4108-2:2013-02, 2013: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.

DIN 4108-3:2018-10, 2018: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden -Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.

DIN 5034-1:2011-07, 2011: Tageslicht in Innenräumen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.

DIN 68800-2:2012-02, 2012: Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau.

DIN EN 1027:2016-09, 2016: Fenster und Türen. Schlagregendichtheit - Prüfverfahren.

DIN EN 12056-3:2000, 2001: Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden. Teil 3: Dachentwässerung, Planung und Bemessung.

- DIN EN 12154:1999, 2000: Vorhangfassaden - Schlagregendichtheit - Leistungsanforderungen und Klassifizierung.
- DIN EN 12208:1999, 2000: Fenster und Türen - Schlagregendichtheit - Klassifizierung.
- DIN EN 13162:2015-04, 2015: Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW)- Spezifikation.
- DIN EN 13583:2012-10, 2012: Abdichtungsbahnen - Bitumen-, Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen - Bestimmung des Widerstandes gegen Hagelschlag.
- DIN EN 14437:2005-02, 2005: Bestimmung des Abhebewiderstandes von Dachdeckungen mit Dachziegeln oder Dachsteinen (Dachpfannen) - Prüfverfahren für Dachsysteme.
- DIN EN 15643-2:2011-05, 2011: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 2: Rahmendbedingungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität.
- DIN EN 15978:2012-10, 2012: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode. Deutsche Fassung EN 15978:2011.
- DIN EN 17037:2019-03, 2019: Tageslicht in Gebäuden; Deutsche Fassung EN 17037:2018.
- DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12, 2010: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten.
- DIN EN 1991-1-4:2010-12, 2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke -Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen Windlasten.
- DIN EN 1996-2/NA:2012-01, 2012: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten Teil 2: Planung, Auswahl der Baustoffe und Ausführung von Mauerwerk.
- DIN EN IEC 61215-2:2019-06, 2019: Terrestrische Photovoltaik (PV)-Module - Bauarteignung und Bauartzulassung - Teil 2: Prüfverfahren.
- DIN EN ISO 14044:2018-05, 2018: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018.
- DIN EN ISO 15265:2004-11, 2004: Ergonomie der thermischen Umgebung - Strategie zur Risikobeurteilung zur Abwendung von Stress oder Unbehagen unter thermischen Arbeitsbedingungen (ISO 15265:2004), 2004.
- DIN EN ISO 6946:2018-03, 2018: Bauteile Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren.
- DIN EN ISO 9806:2018-04, 2018: Solarenergie - Thermische Sonnenkollektoren - Prüfverfahren (ISO 9806:2017).
- DIN V 18599-10:2018-09, 2018: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten.
- DIN V 18599-4:2018-09, 2018: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2012: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen - RStO 12.

- FLL – Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (Hrsg.), 2008: Dachbegrünungsrichtlinie - Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen. 6. Auflage. Bonn.
- FLL – Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (Hrsg.), 2018<sup>a</sup>: Dachbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für Planung Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen. 2018. Auflage. Bonn.
- FLL – Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (Hrsg.), 2018b: Fassadenbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für die Planung Ausführung und Pflege von Wand- und Fassadenbegrünungen. 2018. Auflage. Bonn.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2012: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. RStO 12. 2012. Auflage. FGSV R1 - Regelwerke, Bd. 499. Köln.
- GRO – Green Roof Organisation, 2014: The GRO Green Roof Code. Green Roof Code of Best Practice for the UK 2014.
- ICE/TS 62915:2018-05, 2018: Photovoltaik(PV)-Module - Bauartzulassung, Entwurfs- und Sicherheitsqualifizierung - Wiederholungsprüfung.
- IEC 61215:2005, 2005: Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval.
- IEC 61215-2:2016, 2016: Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 2: Test procedures.
- IEC 61646:2008, 2008: Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval.
- ISO 15099:2003-11, 2003: Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Sonnenschutzvorrichtungen - Detaillierte Berechnungen.
- SN 564271 SIA 271:2007, 2007: Abdichtungen von Hochbauten.
- SN 564312, SIA 312: 2013, 2013: Begrünung von Dächern.
- UNI 11235:2015, 2015: Criteria for design, execution, testing and maintenance of roof garden.
- ZVDH – Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks, 2017: Deutsches Dachdeckerhandwerk - Regeln für Abdichtungen. 7. Auflage. Fachtechnik. Köln.

### **12.3. Gesetze**

- BRD – Bundesrepublik Deutschland, 2009: Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz). BNatSchG.
- BRD – Bundesrepublik Deutschland, 2017: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). KrWG.
- BW – Land Baden-Württemberg, 2015: Gesetz zum Schutz der Natur und zur Pflege der Landschaft (Naturschutzgesetz). NatSchG.
- EU – Europäische Union, 2008: Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa, Bd. 51.

## 12.4. Internetquellen

- BauNetz Media GmbH, 23. 05. 2019: Regenwasserversickerung. Zugriff: <https://www.baunetzwissen.de/gebauedetechnik/fachwissen/entwaesserung/regenwasserversickerung-160288> [abgerufen am 23. 05. 2019].
- Bauwion, 2019: Abdichtung – Braune Wanne. Zugriff: <https://www.bauwion.de/wissen/rohbau/bodenplatte-keller/107-abdichtung-braune-wanne> [abgerufen am 19. 02. 2019].
- BfN – Bundesamt für Naturschutz, 2019: Floraweb - Daten und Informationen zu Wildpflanzen und zur Vegetation in Deutschland. Zugriff: <http://www.floraweb.de> [abgerufen am 23. 09. 2019].
- BMI – Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2018b: Graue Energie - WECOBIS - Ökologisches Baustoffinformationssystem. Zugriff: <https://www.wecobis.de/service/lexikon/graue-energie-lex.html> [abgerufen am 6. 11. 2019].
- CRRC – Cool Roof Rating Council, 2019: Rated Products Directory [abgerufen am 31. 10. 2019].
- CSC – Climate Service Center, 8. 10. 2018: Wiki Klimawandel. Starkregen und Hochwasser in Deutschland. Zugriff: [http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Starkregen\\_und\\_Hochwasser\\_in\\_Deutschland](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Starkregen_und_Hochwasser_in_Deutschland) [abgerufen am 8. 10. 2018].
- DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2009: Artenfilter Regiosaatgutarten. Zugriff: <http://sup05.umwelt.uni-hannover.de/artenfilter/index.php> [abgerufen am 7. 11. 2019].
- DWD – Deutscher Wetterdienst, 2016c: Mustertabelle KOSTRA-DWD. Zugriff: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra\\_dwd\\_rasterwerte/download/mustertabelle\\_kostra\\_dwd.pdf;jsessionid=5C08D2DBF10820BF652F223B0020COBB.live21064?\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/download/mustertabelle_kostra_dwd.pdf;jsessionid=5C08D2DBF10820BF652F223B0020COBB.live21064?_blob=publicationFile&v=6) [abgerufen am 2. 11. 2018].
- DWD – Deutscher Wetterdienst, 30. 10. 2018: Deutscher Klimaatlas. Änderungen der Lufttemperatur. Zugriff: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html) [abgerufen am 30. 10. 2018].
- DWD – Deutscher Wetterdienst, 12. 09. 2018: Warnkriterien. Offenbach. Zugriff: [https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen\\_aktuell/kriterien/warnkriterien.html](https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html) [abgerufen am 12. 09. 2018].
- DWD – Deutscher Wetterdienst, 2016d: KOSTRA-DWD. Rasterwerte. Zugriff: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra\\_dwd\\_rasterwerte/kostra\\_dwd\\_rasterwerte.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte.html) [abgerufen am 11. 03. 2019].
- DWD – Deutscher Wetterdienst, 23. 10. 2019: Erläuterungen zur Auswahl der Bebauungstypen. Zugriff: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/inkas/textbausteine/fl\\_analyse/intro\\_flaechenanal\\_bebauungstypen.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/inkas/textbausteine/fl_analyse/intro_flaechenanal_bebauungstypen.html) [abgerufen am 23. 10. 2019].
- GALK – Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz, 2019: Straßenbaumliste. Zugriff: <https://www.galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themeneubersicht/strassenbaumliste> [abgerufen am 8. 11. 2019].
- Hagelregister, 1. 12. 2018: VKF Prüfbestimmungen. Zugriff: <https://www.hagelregister.ch/fachinfos-bauteile/pruefbestimmungen/vkf-pruefbestimmungen.html> [abgerufen am 29. 10. 2019].
- Hofstetter Mühle GmbH, 22. 10. 2019: Dachbegrünung - Pflanzen für grüne Dächer. Vegetationsmatte, Sedumteppich. Zugriff: <https://www.dach-begrueung.de/vegetationsmatte-sedumteppich> [abgerufen am 22. 10. 2019].

- Hübner-Lee GmbH & Co. KG, 2019: Hübner-Lee Planungsordner. Versiegelungsfreie Grün- und Pflasterflächen. Holzgünz. Zugriff: <https://www.huebner-lee.de/rasengitter-aussenanlagen/>.
- IHME – Institute for Health Metrics and Evaluation, 2017: What risk factors drive the most death and disability combined? Deutschland. Zugriff: <http://www.healthdata.org/germany> [abgerufen am 1. 10. 2019].
- Infoflora, 2014: Listen & Infoblätter. Zugriff: <https://www.infoflora.ch/de/neophyten/listen-und-infobl%C3%A4tter.html> [abgerufen am 7. 11. 2019].
- INTEP, 7. 11. 2018: Expositionsclassen Starkregen. Zugriff: <http://www.andreasschoeps.de/intep/regen.html> [abgerufen am 7. 11. 2018].
- Knauf Insulation, 22. 10. 2019: Dachbegrünung. Urbanscape Gründach-System. Zugriff: <https://www.knaufinsulation.de/produkte/urbanscape-gruendach-system> [abgerufen am 22. 10. 2019].
- LUBW – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 18. 10. 2018: Klimawandel und Anpassung. Hochwasserereignisse nehmen weiter zu. Zugriff: <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/klimawandel-und-anpassung/hochwasser> [abgerufen am 18. 10. 2018].
- LUBW – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2019: Daten- und Kartendienst der LUBW. Umwelt-Daten und Karten Online. Zugriff: <http://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/pages/map/default/index.xhtml>, Überflutungstiefen [abgerufen am 26. 02. 2019].
- Oliver Dürhammer, 5. 11. 2019: Moose Deutschland. Zugriff: [www.moose-deutschland.de](http://www.moose-deutschland.de) [abgerufen am 5. 11. 2019].
- Optigrün, 2019: Drainageplatten - Dachbegrünung von Optigrün. Zugriff: <https://www.optigruen.de/produkte/draenageplatten/> [abgerufen am 8. 05. 2019].
- Stadtverwaltung Mönshheim, 3. 07. 2019: Starkregengefahrenkarten. Zugriff: [https://www.moensheim.de/rathaus/rathausnachrichten/starkregengefahrenkarten-id\\_1102/](https://www.moensheim.de/rathaus/rathausnachrichten/starkregengefahrenkarten-id_1102/) [abgerufen am 15. 10. 2019].
- UBA – Umweltbundesamt, 2012: ProBas - Prozessdetails: Bentonit. Zugriff: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B8134CC95-DA9F-4670-BB70-BB2A0A04C6E4%7D> [abgerufen am 14. 05. 2019].
- UBA – Umweltbundesamt, 7. 06. 2019: Die Treibhausgase. Zugriff: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase> [abgerufen am 7. 06. 2019].
- VKF – Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen, 2019: Hagelregister. VKF Prüfbestimmungen. Zugriff: <https://www.hagelregister.ch/fachinfos-bauteile/pruefbestimmungen/vkf-pruefbestimmungen.html> [abgerufen am 14. 11. 2019].
- VKG – Vereinigung Kantonalen Gebäudeversicherungen, 2018: Schutz vor Naturgefahren. Hagel. Zugriff: <https://www.schutz-vor-naturgefahren.ch/naturgefahren/hagel.html> [abgerufen am 7. 11. 2018].
- VKG – Vereinigung Kantonalen Gebäudeversicherungen, 2019: Hagelregister [abgerufen am 31. 10. 2019].

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ansichten der Musterliegenschaft.....	17
Abbildung 2: Grundriss UG der Musterliegenschaft .....	18
Abbildung 3: Grundriss EG der Musterliegenschaft .....	18
Abbildung 4: Grundriss 1. OG der Musterliegenschaft.....	19
Abbildung 5: Schnitt A-A der Musterliegenschaft mit den Standard-Bauteilaufbauten .....	19
Abbildung 6: Jährliche Anzahl der heißen Tage mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 °C .....	27
Abbildung 7: Mittlere jährliche Anzahl der heißen Tage .....	28
Abbildung 8: Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in den hydrologischen Halbjahren, Trend in °C/85 Jahre im Zeitraum 1931 - 2015 .....	29
Abbildung 9: Veränderung der Anzahl der heißen Tage im Zeitraum 1981 - 2010 im Vergleich zum Zeitraum 1951 - 1980 in Nordrhein-Westfalen.....	29
Abbildung 10: Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in K im Sommer unter Verwendung des Klimaszenarios A1B für das Zeitfenster 2070 - 2100.....	30
Abbildung 11: Entwicklung der maximal eintägigen Gebietsniederschlagshöhe im hydrologischen Winter in mm.....	32
Abbildung 12: Entwicklung der maximal eintägigen Gebietsniederschläge im hydrologischen Sommer in mm.....	33
Abbildung 13: Entwicklung der Niederschlagshöhe in mm von Starkregenereignissen in Thüringen vom Zeitraum 1961 - 1990 zum Zeitraum 1987 - 2016 .....	34
Abbildung 14: Räumliche Verteilung der Trends für die Entwicklung des 90 %-Quantils der Tagesniederschläge im Winter, Zeitraum 1951 - 2005.....	34
Abbildung 15: Anteil der Niederschläge oberhalb des 90 %-Quantils der maximalen Niederschlagshöhen am Gesamtniederschlag.....	35
Abbildung 16: Änderungssignale unterschiedlicher Niederschlagsdauerstufen von KOSTRA-DWD-2010 zu KOSTRA-DWD-2000 in %.....	36
Abbildung 17: Klimaänderungsfaktoren in Baden-Württemberg .....	40
Abbildung 18: Hagelindexkarte für Deutschland .....	41
Abbildung 19: Übersicht über die Hagelhäufigkeit in Europa.....	42
Abbildung 20: Schadenaufwand und Schadensatz in der Verbundenen Wohngebäudeversicherung.....	44
Abbildung 21: Datenbankabfragen in der European Severe Weather Database ESWD für die Phänomene Tornado, Sturm, Hagel und Starkregen .....	46
Abbildung 22: Abweichung des 95. Perzentils der geostrophischen Windstärke vom langjährigen Mittel .....	47



Abbildung 23: Windzone in Deutschland in Anlehnung an DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12.....	49
Abbildung 24: Relative Veränderung der Böenextrema für eine zehnjährliche Wiederkehrperiode .....	50
Abbildung 25: Übersicht Sommerklimaregionen in Deutschland in Anlehnung an DIN 4108-2:2013-02 .....	53
Abbildung 26: Ergebnisse der WinSLT-Berechnung .....	58
Abbildung 27: Simulationsmodell für IDA ICE.....	59
Abbildung 28: Anzahl der heißen Tage für den Standort Potsdam bei unterschiedlichen Datensätzen .....	61
Abbildung 29: Anzahl der Sommertage für den Standort Potsdam bei unterschiedlichen Datensätzen .....	61
Abbildung 30: Anzahl der Tropennächte für den Standort Potsdam bei unterschiedlichen Datensätzen .....	62
Abbildung 31: Anzahl der heißen Tage für den Standort Mannheim bei unterschiedlichen Datensätzen .....	62
Abbildung 32: Anzahl der Sommertage für den Standort Mannheim bei unterschiedlichen Datensätzen .....	63
Abbildung 33: Anzahl der Tropennächte für den Standort Mannheim bei unterschiedlichen Datensätzen .....	63
Abbildung 34: In der Klimasimulation ausgewertete Räume .....	64
Abbildung 35: Übertemperaturgradstunden in Kh/a für den Standort Potsdam .....	65
Abbildung 36: Übertemperaturgradstunden in Kh/a für den Standort Mannheim .....	66
Abbildung 37: Aufsteigend sortierte Übertemperaturgradstunden in Kh/a der einzelnen Datensätze .....	67
Abbildung 38: Schichtaufbau Außenwand Kalksandstein mit WDVS aus EPS.....	74
Abbildung 39: Treibhauspotential verschiedener Varianten mit Kalksandstein und WDVS .....	75
Abbildung 40: Nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf verschiedener Varianten mit Kalksandstein und WDVS.....	75
Abbildung 41: Schichtaufbau Außenwand Stahlbeton mit WDVS aus expandiertem Polystyrol (EPS).....	76
Abbildung 42: Schichtaufbau Außenwand mit Thermoplan .....	77
Abbildung 43: Treibhauspotential verschiedener Varianten mit Stahlbeton und EPS sowie Thermoplan-Ziegel.....	77
Abbildung 44: Nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf verschiedener Varianten mit Stahlbeton und EPS sowie Thermoplan-Ziegel.....	78
Abbildung 45: Schichtaufbau Außenwand vorgehängte hinterlüftete Fassade.....	79

Abbildung 46: Schichtaufbau Außenwand zweischaliges, hinterlüftetes Mauerwerk .....	79
Abbildung 47: Treibhauspotential Zweischaliges Mauerwerk und verschiedener Varianten einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade .....	80
Abbildung 48: Nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf Zweischaliges Mauerwerk und verschiedenen Varianten einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade.....	81
Abbildung 49: Schichtaufbau Flachdach .....	82
Abbildung 50: Schichtaufbau Außenwand Holzständerbauweise .....	82
Abbildung 51: Schichtaufbau Flachdach Holzstapelbauweise .....	83
Abbildung 52: Schematische Aufbauten oberhalb der TTE Gitter der wassergebundenen Decke, Schotterschicht und Wiese .....	87
Abbildung 53: Ergebnisse der thermischen Simulation .....	88
Abbildung 54: Tageslichtfaktor für die Standardverglasung.....	90
Abbildung 55: Tageslichtfaktor für die Sonnenschutzverglasung.....	91
Abbildung 56: Übertemperaturgradstunden in Kh/a mit/ohne Sonnenschutzverglasung .....	92
Abbildung 57: Prozentuale Reduktion auf Grund der Sonnenschutzverglasung.....	92
Abbildung 58: Raumtiefe in Abhängigkeit der Sturzhöhe zur Tageslichtversorgung .....	93
Abbildung 59: Vertikaler Winkel zwischen der Mitte des Fensters und der Nachbarbebauung .....	94
Abbildung 60: Systemskizze zur Verwendung der Wärmepumpe als Heizung .....	98
Abbildung 61: Systemskizze zur Verwendung der Wärmepumpe als Kühlung .....	98
Abbildung 62: Jahreszeitabhängiger Temperaturverlauf im Erdreich .....	99
Abbildung 63: Simulationsmodelle der Musterliegenschaft mit Bitumendachbahn und weißer Kunststoffdichtungsbahn.....	102
Abbildung 64: Klimadaten für den Untersuchungstag 25. Juni .....	103
Abbildung 65: Oberflächentemperaturen in °C der Bauteile bei Verwendung einer Bitumendachbahn .....	104
Abbildung 66: Oberflächentemperaturen in °C der Bauteile bei Verwendung einer weißen Kunststoffdichtungsbahn.....	104
Abbildung 67: Oberflächentemperaturdifferenz in °C zwischen Bitumendachbahn und weißer Kunststoffdichtungsbahn.....	105
Abbildung 68: Lufttemperaturdifferenz in K zwischen Bitumen- und weißer Kunststoffbahn.....	106
Abbildung 69: Lufttemperaturdifferenz in K zwischen Bitumen- und weißer Kunststoffbahn 3,5 m über GOK .....	106

Abbildung 70: Lufttemperaturdifferenz in K vor der Fassade.....	107
Abbildung 71: Änderung des hochwassergefährdeten Bereichs durch den klimawandelbedingten Anstieg des Hochwasserstands.....	109
Abbildung 72: Übersicht über die geeigneten Rasterfelder .....	110
Abbildung 73: Ausschnitt einer Starkregengefahrenkarte für Mönshaus im Enzkreis.....	112
Abbildung 74: Prinzipieller Aufbau einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade .....	114
Abbildung 75: Dachaufbau D01 Warmdach mit freiliegender Abdichtung.....	118
Abbildung 76: Dachaufbau D02 Umkehrdach mit Kies .....	120
Abbildung 77: Dachaufbau D03 extensiv begrüntes Dach .....	122
Abbildung 78: Dachaufbau D04 intensiv begrüntes Retentionsdach mit Drossel.....	124
Abbildung 79: GWP Dach .....	126
Abbildung 80: PENRT Dach .....	126
Abbildung 81: GWP Variante D01.....	128
Abbildung 82: PENRT Variante D01 .....	128
Abbildung 83: Möglichkeiten der Regenwasserrückhaltung auf dem Gelände.....	130
Abbildung 84: Strategien im Umgang mit der Einwirkung Hochwasser .....	131
Abbildung 85: Eintrittsmöglichkeiten von Wasser in das Gebäude.....	133
Abbildung 86: Höhe der wasserundurchlässig ausgebildeten Bauteile über Geländeoberkante.....	134
Abbildung 87: Bauteilaufbau Variante K01, Wand, gedämmt / ungedämmt .....	138
Abbildung 88: Bauteilaufbau der Variante K01, Bodenplatte, gedämmt/ungedämmt .....	139
Abbildung 89: Bauteilaufbau der Variante K02, Wand, gedämmt/ungedämmt.....	140
Abbildung 90: Bauteilaufbau der Variante K02, Bodenplatte, ungedämmt .....	141
Abbildung 91: Bauteilaufbau der Variante K02, Bodenplatte, gedämmt.....	141
Abbildung 92: Funktionsweise und Mindestabmessungen einer Weißen Wanne .....	142
Abbildung 93: Bauteilaufbau der Variante K03, Wand, ungedämmt/gedämmt.....	143
Abbildung 94: Bauteilaufbau der Variante K03, Bodenplatte, gedämmt/ungedämmt .....	144
Abbildung 95: GWP Kellerwand, ungedämmt .....	145
Abbildung 96: PENRT Kellerwand, ungedämmt .....	145
Abbildung 97: GWP Bodenplatte, ungedämmt .....	146

Abbildung 98: PENRT Bodenplatte, ungedämmt.....	147
Abbildung 99: GWP Kellerwand, gedämmt.....	147
Abbildung 100: PENRT Kellerwand, gedämmt.....	148
Abbildung 101: GWP Bodenplatte, gedämmt.....	148
Abbildung 102: PENRT Bodenplatte, gedämmt.....	149
Abbildung 103: Fußbodenaufbau F01 Gussasphaltestrich .....	151
Abbildung 104: Fußbodenaufbau F02 schwimmender Zementestrich .....	151
Abbildung 105: Fußbodenaufbau F03 leicht rückbaubarer Bodenbelag, gedämmt.....	152
Abbildung 106: Fußbodenaufbau F03 leicht rückbaubarer Bodenbelag, ungedämmt.....	153
Abbildung 107: Fußbodenaufbau F04 dichter Bodenbelag, gedämmt .....	154
Abbildung 108: Fußbodenaufbau F04 dichter Bodenbelag, ungedämmt.....	154
Abbildung 109: GWP Fußboden, gedämmt .....	156
Abbildung 110: PENRT Fußboden, gedämmt .....	156
Abbildung 111: GWP Fußboden, ungedämmt.....	157
Abbildung 112: PENRT Fußboden, ungedämmt.....	157
Abbildung 113: Bauteilaufbau AW01 – Wärmedämmverbundsystem .....	159
Abbildung 114: Bauteilaufbau der Variante AW02 – Zweischaliges Mauerwerk .....	160
Abbildung 115: Bauteilaufbau AW03 – Vorgehängte hinterlüftete Fassade.....	163
Abbildung 116: GWP Außenwand .....	164
Abbildung 117: PENRT Außenwand .....	165
Abbildung 118: Einfluss der Gestaltung des Traufbereiches auf die Windsoglasten von Flachdächern.....	175
Abbildung 119: Mögliche Gestaltung eines abgerundeten Traufbereiches eines Gründaches mit Hilfe eines in der Tragstruktur verankerten Attika-Fertigteiles (schematisch) .....	175
Abbildung 120: Einwirkung von Windkräften auf PV-Module, die auf einem Flachdach aufgeständert sind .....	176
Abbildung 121: Mögliche zusätzliche Sog- und Verschiebesicherung einer aufgeständerten PV-Anlage.....	177
Abbildung 122: Beispiel für die Ost-West-Aufständigung einer PV-Anlage auf einem Flachdach .....	178

Abbildung 123: Reduzierte Sogbeiwerte für die Fassadenelemente einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade durch eine winddichte Trennung der zur Windrichtung senkrechten und parallelen Wandbereiche .....	179
Abbildung 124: Herkunftsregionen und Produktionsräume für Regiosaatgut, Gliederung Deutschlands in 22 Herkunftsregionen.....	184
Abbildung 125: Herkunftsregionen und Produktionsräume für Regiosaatgut, Zusammenfassung der Herkunftsregionen in 8 Produktionsräume .....	185
Abbildung 126: Musterliegenschaft, Ausgangsszenario, Potsdam 2010 Sommer, PET in °C um 14.00 Uhr .....	229
Abbildung 127: Musterliegenschaft mit Gründach.....	229
Abbildung 128: Lufttemperaturdifferenz in K zwischen Moosdach und bekiestem Dach, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr.....	230
Abbildung 129: Lufttemperaturdifferenz in K zwischen extensiv begrüntem Dach und bekiestem Dach, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr .....	230
Abbildung 130: Musterliegenschaft mit Grünfassade.....	231
Abbildung 131: Veränderung der Lufttemperatur in K durch eine Fassadenbegrünung mit Moos, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr.....	231
Abbildung 132: Veränderung der Lufttemperatur in K durch Fassadenbegrünung mit Efeu, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr.....	232
Abbildung 133: Veränderung PET in °C durch Moosbewuchs der Fassade, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr.....	232
Abbildung 134: Veränderung PET in °C durch Efeubewuchs der Fassade, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr.....	233
Abbildung 135: Begrünung der Außenanlagen mit Bäumen und Hecken, links: Aufsicht, rechts: 3D-Darstellung. ....	233
Abbildung 136: Veränderung der Lufttemperatur in K durch die Begrünung der Außenanlagen, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr.....	234
Abbildung 137: Veränderung PET in °C durch die Begrünung der Außenanlagen, Potsdam 2010 Sommer, 14.00 Uhr.....	234
Abbildung 138: Siedlungstyp Dorfkern, prozentualer Flächenanteil.....	235
Abbildung 139: Siedlungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, prozentualer Flächenanteil .....	236
Abbildung 140: Darstellung des Siedlungstyps Dorfkern als ENVI-MET-Modell (Aufsicht).....	236
Abbildung 141: Dorfkern, Ausgangsszenario, Potsdam 2010 Sommer, Lufttemperatur in °C um 14.00 Uhr.....	237
Abbildung 142: Dorfkern, Ausgangsszenario, Potsdam 2010 Sommer, PET in °C um 14.00 Uhr.....	237

Abbildung 143: Dorfkern, Moosdach und Efeufassade, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr .....	238
Abbildung 144: Dorfkern, Moosdach und Efeufassade, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET in K um 14.00 Uhr.....	238
Abbildung 145: Dorfkern, extensive Dachbegrünung und Moosfassade, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr.....	239
Abbildung 146: Dorfkern, extensive Dachbegrünung und Moosfassade, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung PET in K um 14.00 Uhr.....	239
Abbildung 147: Darstellung des Siedlungstyps Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung als ENVI-MET-Modell (Aufsicht) .....	240
Abbildung 148: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Ausgangsszenario, Potsdam 2010 Sommer, Lufttemperatur in °C um 14.00 Uhr.....	241
Abbildung 149: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Ausgangsszenario, Potsdam 2010 Sommer, PET in °C um 14.00 Uhr .....	241
Abbildung 150: Anordnung der Winterlinden, Apfelbäume und Hainbuchen-/Haselhecken.....	242
Abbildung 151: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 1, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr.....	243
Abbildung 152: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 1, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET in K um 14.00 Uhr .....	243
Abbildung 153: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 2, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr.....	244
Abbildung 154: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 3, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr.....	245
Abbildung 155: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 3, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET um 14.00 Uhr .....	245
Abbildung 156: Begrünungsszenario 1 mit zusätzlichen Wasserflächen.....	246
Abbildung 157: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 1 + Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit Begrünungsszenario 1 .....	246
Abbildung 158: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, Begrünungsszenario 1 + Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit Begrünungsszenario 1 .....	247
Abbildung 159: Begrünungsszenario 1b mit reduzierter Anzahl an Apfelbäumen .....	248
Abbildung 160: Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen .....	248
Abbildung 161: Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit Begrünungsszenario 1b ohne Wasserflächen.....	249

Abbildung 162: Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit Begrünungsszenario 1 (mehr Apfelbäume).....	249
Abbildung 163: Begrünungsszenario 1 mit Bäumen und Büschen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit dem Ausgangsszenario (nur Gras).....	250
Abbildung 164: Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der Lufttemperatur in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit dem Ausgangsszenario (nur Gras).....	250
Abbildung 165: Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET in °C um 14.00 Uhr im Vergleich mit Begrünungsszenario 1 (mehr Apfelbäume).....	251
Abbildung 166: Begrünungsszenario 1 mit Bäumen und Büschen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit dem Ausgangsszenario (nur Gras).....	252
Abbildung 167: Begrünungsszenario 1b mit Wasserflächen, Potsdam 2010 Sommer, Veränderung der PET in K um 14.00 Uhr im Vergleich mit dem Ausgangsszenario (nur Gras).....	252
Abbildung 168: Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung mit Asphaltdecke und heller Betondecke .....	253
Abbildung 169: Vergleich der Lufttemperaturen in K in 1,5 m über Oberkante Gelände zwischen heller Betonoberfläche und Asphaltdecke.....	254
Abbildung 170: Physiologisch äquivalente Temperatur in °C bei Verwendung einer hellen Betondecke, Potsdam 2010 Sommer.....	254
Abbildung 171: Physiologisch äquivalente Temperatur in °C bei Verwendung einer Asphaltdecke, Potsdam 2010 Sommer.....	255
Abbildung 172: Ausgewertete Zonen der Musterliegenschaft.....	257

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Im Bauwesen geläufige Wirkungskategorien und Umweltwirkungen.....	21
Tabelle 2: EU-Grenzwerte und Empfehlung der WHO für Feinstaubgrenzwerte.....	26
Tabelle 3: Schwellenwerte für unterschiedliche Wetterwarnungsstufen .....	31
Tabelle 4: Hagelschaden-Skala – Schadenwirkung von Hagel bei unterschiedlicher Korngröße.....	43
Tabelle 5: Mögliche Änderungen der Einwirkung Wind an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071 - 2100) im Vergleich zum Zeitraum 1961 - 1990.....	48
Tabelle 6: Windzonen mit zugehörigen Basiswindgeschwindigkeiten und Basisgeschwindigkeitsdrücken.....	49
Tabelle 7: Anforderungswert in Abhängigkeit der Sommerklimaregion und der Nutzungsart.....	52
Tabelle 8: Bauteilaufbau Innenwände für Simulation.....	55
Tabelle 9: Bauteilaufbau Außenwände für Simulation.....	55

Tabelle 10: Bauteilaufbau Erdberührte Außenwand für Simulation .....	55
Tabelle 11: Bauteilaufbau Erdgeschoss Decke für Simulation .....	56
Tabelle 12: Bauteilaufbau Kellerdecke für Simulation .....	56
Tabelle 13: Bauteilaufbau Boden gegen Erdreich für Simulation.....	57
Tabelle 14: Bauteilaufbau Dach für Simulation.....	57
Tabelle 15: Untersuchte Wetterdatensätze .....	60
Tabelle 16: Übertemperaturgradstunden für den Standort Potsdam .....	65
Tabelle 17: Übertemperaturgradstunden für den Standort Mannheim .....	66
Tabelle 18: Expositionsclassen für die Einwirkung Sommerhitze .....	67
Tabelle 19: Starkregenindex nach Schmitt et al. (2018).....	68
Tabelle 20: Starkregenindex nach Mudersbach (2016).....	68
Tabelle 21: Dauer, Jährlichkeit und Starkregenindex der Bemessungsregenspenden.....	69
Tabelle 22: Expositionsclassen für die Einwirkung Starkregen .....	69
Tabelle 23: Klimaangepasste Niederschlagshöhen in mm für den Musterstandort .....	70
Tabelle 24: Expositionsclassen Starkregen .....	70
Tabelle 25: Expositionsclassen Hochwasser.....	71
Tabelle 26: Expositionsclassen Hagel.....	73
Tabelle 27: Expositionsclassen Sturm.....	73
Tabelle 28: Ergebnisse der Ökobilanz Aufbau mit Asphaltdeckschicht.....	84
Tabelle 29: Ergebnisse der Ökobilanz Aufbau mit Pflastersteinen.....	85
Tabelle 30: Ergebnisse der Ökobilanz Aufbau mit Sickersteinen.....	86
Tabelle 31: Ergebnisse der Ökobilanz Aufbau als Holzterrasse.....	86
Tabelle 32: Ergebnisse der Ökobilanz, Aufbau mit TTE-Gittern.....	87
Tabelle 33: Übertemperaturgradstunden in Kh/a für Massivbau aufgrund der Variation der Oberfläche des Flachdachs .....	101
Tabelle 34: Übertemperaturgradstunden in Kh/a für Holzbau aufgrund der Variation der Oberfläche des Flachdachs .....	102
Tabelle 35: Materialkennwerte Bitumendachbahn und weiße Kunststoffdichtungsbahn .....	102
Tabelle 36: Niederschlagshöhe h <sub>D,T</sub> in mm ohne Berücksichtigung des Klimaänderungsfaktors.....	110
Tabelle 37: Niederschlagshöhe h <sub>D,T</sub> in mm mit Berücksichtigung des Klimaänderungsfaktors.....	111



Tabelle 38: Bemessungsregenspende $r_{D,T}$ in $l/(s \cdot m^2)$ mit Berücksichtigung des Klimaänderungsfaktors .....	111
Tabelle 39: Mindestabflusswerte von Rohrleitungen .....	116
Tabelle 40: Ausgewählte Abflussbeiwerte .....	116
Tabelle 41: Schichtenfolge und Schichtdicken des Dachaufbaus D01 .....	118
Tabelle 42: Regenwasserabfluss je Dachfläche für Dachaufbau D01 Warmdach mit freiliegender Abdichtung in $l/s$ .....	118
Tabelle 43: Zuschlagswerte $\Delta U$ für Umkehrdächer.....	119
Tabelle 44: Schichtenfolge und Schichtdicken des Dachaufbaus D02 .....	120
Tabelle 45: Regenwasserabfluss je Dachfläche für Dachaufbau D02 in $l/s$ .....	120
Tabelle 46: Schichtdicken der Variante D03 .....	122
Tabelle 47: Regenwasserabfluss je Dachfläche für Dachaufbau D03 extensiv begrüntes Dach in $l/s$ ....	122
Tabelle 48: Schichtenfolge und Schichtdicken des Dachaufbaus D04 .....	125
Tabelle 49: Recyclingfaktoren der unterschiedlichen Dachvarianten .....	129
Tabelle 50: Ermittelte Wasserstandshöhen für den Untersuchungsstandort.....	134
Tabelle 51: Wassereinwirkungsklassen für erdberührte Bauteile .....	137
Tabelle 52: Anzahl der Abdichtungslagen für Bodenplatten und Wandflächen bei W2.1-E .....	138
Tabelle 53: Anzahl der Abdichtungslagen für Bodenplatten und Wandflächen bei W2.2-E .....	138
Tabelle 54: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante K01, Wand, gedämmt / ungedämmt.....	139
Tabelle 55: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante K01, Bodenplatte, gedämmt/ungedämmt.....	139
Tabelle 56: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante K02, Wand, gedämmt/ungedämmt .....	141
Tabelle 57: Schichtfolgen und Schichtdicken der Variante K02, Bodenplatte, ungedämmt.....	141
Tabelle 58: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante K02, Bodenplatte, gedämmt .....	142
Tabelle 59: Beanspruchungsklassen für Weiße Wannen .....	142
Tabelle 60: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante K03, Wand, gedämmt/ungedämmt .....	143
Tabelle 61: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante K03, Bodenplatte, gedämmt/ungedämmt.....	144
Tabelle 62: Recyclingfaktor Keller.....	150
Tabelle 63: Schichtenfolge und Schichtdicken des Fußbodenaufbaus F01 .....	151
Tabelle 64: Schichtenfolge und Schichtdicken des Fußbodenaufbaus F02 .....	152
Tabelle 65: Schichtenfolge und Schichtdicken des Fußbodenaufbaus F03, gedämmt .....	153

Tabelle 66: Schichtenfolge und Schichtdicken des Fußbodenaufbaus F03, ungedämmt .....	153
Tabelle 67: Schichtenfolge und Schichtdicken des Fußbodenaufbaus F04, gedämmt .....	154
Tabelle 68: Schichtenfolge und Schichtdicken des Fußbodenaufbaus F04, ungedämmt .....	154
Tabelle 69: Recyclingfaktoren der Fußbodenaufbauten.....	158
Tabelle 70: Schichtfolge und Schichtdicken der Variante AW01 .....	160
Tabelle 71: Schichtenfolge und Schichtdicken der Variante AW02 .....	160
Tabelle 72: Schichtenfolge und Schichtdicken des Außenwandaufbaus AW03 .....	163
Tabelle 73: Recyclingfaktoren der Außenwandaufbauten.....	165
Tabelle 74: Im Hagelregister enthaltene WDVS-Systeme mit in Abhängigkeit des Dämmmaterials erzielten Hagelwiderstandsklassen.....	171
Tabelle 75: Sensitivitätsanalyse der Maßnahme "Dachbegrünung" zum Aspekt der Strukturvielfalt .....	189
Tabelle 76: Sensitivitätsanalyse der Maßnahme "Dachbegrünung" zum Aspekt der Sonderformen.....	190
Tabelle 77: Eignungsübersicht und Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Pflanzenkletterformen und Fassadentypen .....	194
Tabelle 78: Sensitivitätsanalyse der Maßnahme "Fassadenbegrünung" zum Aspekt der Strukturvielfalt .....	195
Tabelle 79: Sensitivitätsanalyse der Maßnahme "Fassadenbegrünung" zum Aspekt der Pflanzenauswahl und Vernetzung.....	196
Tabelle 80: Sensitivitätsanalyse der Maßnahme "Außenanlage" zum Aspekt der Strukturvielfalt.....	201
Tabelle 81: Feinstaubaufnahme PM10 und PM2,5 in mg/cm <sup>2</sup> .....	210
Tabelle 82: Fortführung der Tabelle 81: Feinstaubaufnahme PM10 und PM2,5 in mg/cm <sup>2</sup> .....	211
Tabelle 83: Pflanzenliste für extensive bis semi-intensive Dachbegrünung .....	214
Tabelle 84: Kletterpflanzenliste für Fassadenbegrünung.....	215
Tabelle 85: Staudenpflanzenliste für semi-intensive bis intensive Dachbegrünungen, Fassadenbegrünung und Außenanlagen.....	218
Tabelle 86: Kleingehölzliste für semi-intensive bis intensive Dachbegrünungen und Außenanlagen.....	220
Tabelle 87: Baumartenliste für Außenanlagen .....	222
Tabelle 88: Physiological equivalent temperature (PET)-Index in °C .....	223
Tabelle 89: Maximale Lufttemperaturdifferenzen in K je Begrünungsszenario.....	257
Tabelle 90: Übertemperaturgradstunden in Kh/a gemäß DIN 4108-3:2018-10 und prozentuale Veränderung in Bezug zum Ausgangsszenario.....	258

Tabelle 91: Checkliste für die Bauteilgruppe Keller.....	260
Tabelle 92: Checkliste für den Fußbodenaufbau .....	261
Tabelle 93: Checkliste für die Außenwand .....	262
Tabelle 94: Fortführung Checkliste für die Außenwand.....	263
Tabelle 95: Checkliste für das Dach.....	264
Tabelle 96: Fortführung der Checkliste für das Dach .....	265
Tabelle 97: Fortführung der Checkliste für das Dach .....	266
Tabelle 98: Fortführung der Checkliste für das Dach .....	267
Tabelle 99: Checkliste für die Dachaufbauten.....	268
Tabelle 100: Checklisten für die Außenanlagen.....	269
Tabelle 101: Fortführung der Checkliste für die Außenanlagen.....	270

## **Impressum**

Werner Sobek Green Technologies GmbH  
Albstr. 14  
70597 Stuttgart  
Germany

Tel +49.711.76750-00  
Fax +49.711.76750-44

greentech@wernersobek.com  
www.wernersobek.com

Registergericht Stuttgart, HRB 724117  
Geschäftsführer: Dipl.-Betriebswirt Kurt Denzel

Partners & Associate Partners:  
Prof. Dr. Klaus Sedlbauer  
Prof. Dr. Dr. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek  
Prof. Dr. Michael Bruse  
Prof. Dr. Susan Draeger

## **Autoren des vorliegenden Berichts**

Dr.-Ing. Marc-Steffen Fahrion  
Prof. Dr. Susan Draeger  
Dr. rer. nat. Michael Lakatos  
Prof. Dr. sc. hum. M. Arch. Dipl.-Ing. Timo Schmidt  
M. Eng. Christoph Nickl  
M. Sc. Moritz Brombacher  
M. Sc. Deekshitha Bangalore  
Dr.-Ing. Wolfgang Sundermann