



BBSR-  
Online-Publikation  
33/2022

# Bewässerte Gründächer

von

Prof. Dr. Manfred Köhler  
Daniel Kaiser  
Fiona Wolff



## Bewässerte Gründächer

Regenwasserbewirtschaftung mit bewässerten Gründächern zur Gebäudeklimatisierung sowie zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-16.41

Projektlaufzeit: 11.2016 bis 12.2018

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Fachbetreuer

Dr.-Ing. Michael Brüggemann  
Brüggemann Kisseler Ingenieure  
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“  
zb@bbr.bund.de

### Autorinnen und Autoren

Hochschule Neubrandenburg, Neubrandenburg  
Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik  
Prof. Dr. Manfred Köhler (wiss. Projektleitung)

Daniel Kaiser, M. Sc. (wiss. Bearbeiter)  
kaiser@lvga-bb.de

Fiona Wolff, M. Sc. (wiss. Hilfskraft)

### Redaktion

Hochschule Neubrandenburg, Neubrandenburg  
Prof. Dr. Manfred Köhler  
Daniel Kaiser, M. Sc.  
Anna Reder (Lektorat)

### Stand

Juni 2022

### Gestaltung

Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V., Bonn  
Lea Nollen  
Dorothea Grzeczniak

### Bildnachweis

Titelbild: Prof. Dr. Manfred Köhler  
Alle weiteren Abbildungen: Prof. Dr. Manfred Köhler

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Kaiser, Daniel; Köhler, Manfred; Wolff, Fiona, 2022: Bewässerte Gründächer: Regenwasserbewirtschaftung mit bewässerten Gründächern zur Gebäudeklimatisierung sowie zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität. BBSR-Online-Publikation 33/2022, Bonn.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>6</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Einführung und Motivation</b> .....	<b>9</b>
1.1 Aufgabenstellung .....	10
1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	12
1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	13
<b>2 Formen der Dachbegrünung</b> .....	<b>15</b>
2.1 Gründächer .....	15
2.2 Extensive Dachbegrünung.....	16
2.3 Bewässerte Gründächer .....	17
2.4 Sonderformen .....	18
<b>3 Stand der Technik</b> .....	<b>19</b>
3.1 Evapotranspiration im urbanen Raum .....	20
3.2 Biodiversität.....	21
3.3 Aktive Verbesserung von Pflanzenwachstum durch höhere Speicherung, lokale Anpassungen der Bauweisen.....	22
3.4 Wirkung auf das Gebäude und das Umfeld.....	24
3.5 Wirkung im Stadtraum .....	25
3.6 Einfluss der Alterung auf das Retentionsverhalten .....	26
3.7 Kühlungseffekt/Energetische Aspekte.....	26
3.8 Dauerhaftigkeit.....	26
3.9 Regenwasserrückhalt und Abflussverzögerung durch extensive Gründächer .....	27
3.10 Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung .....	27
3.11 Dachbegrünungen als Element der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung.....	28
3.12 Gründächer in der Wasserwirtschaft.....	31
3.13 Wasserwirtschaft .....	33
3.14 Siedlungswasserwirtschaft.....	33
3.15 Das Einstaudach als Element der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung .....	34
<b>4 Messungen: Wiegende Kleinlysimeter (HSNB)</b> .....	<b>35</b>
4.1 Funktionsweise von wiegenden Kleinlysimetern .....	36
4.2 Monitoringsysteme .....	36
4.3 Aufbau der Messstation .....	37
4.4 Verwendete Schichtaufbauten .....	40
4.5 Methodik.....	41
4.6 Mittlere tägliche Verdunstungswerte.....	44
4.7 Mittlere jährliche Verdunstungsleistung .....	45
<b>5 Ablaufmessung</b> .....	<b>46</b>
5.1 Haus 2 .....	46
5.2 Haus 3 .....	49
5.3 Aufbau der Großvolumenkippen.....	51
5.4 Kalibrierung der Großvolumenkippen .....	52



5.5	Jährliches Ablaufverhalten von extensiven Gründächern .....	52
5.6	Niederschlagsrückhalt in der Vegetationsperiode .....	55
5.7	Errechner und gemessener Niederschlagsabfluss .....	56
<b>6</b>	<b>Temperaturreduzierung an der Dachabdichtung und Vegetationsdecke (Messung 2017) .....</b>	<b>59</b>
6.1	Temperaturmessungen an der Vegetationsdecke (Messung 2018) .....	64
6.2	Temperaturreduzierung in 50 cm Höhe (Messung 2018) .....	65
<b>7</b>	<b>Abnahme der Verdunstungsleistung nach einer Bewässerung.....</b>	<b>66</b>
7.1	Maximale Aufsättigung .....	68
7.2	Steigerung der Evapotranspiration in Hitzeperioden von extensiven Gründächern .....	73
<b>8</b>	<b>Potentielle Kühlleistung im Stadtraum.....</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>Mögliche Einbindung in die Haustechnik.....</b>	<b>79</b>
<b>10</b>	<b>Pflege und Wartung von bewässerten extensiven Gründächern .....</b>	<b>81</b>
<b>11</b>	<b>Kosten und Nutzen .....</b>	<b>82</b>
<b>12</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>84</b>
<b>13</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>86</b>
	<b>Mitwirkende.....</b>	<b>87</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>88</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>94</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>97</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>98</b>

## Vorwort

Seit 2011 unterstützt die Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) die Aktion „Mehr Grün im Bauwesen“ im Rahmen der Forschungsinitiative "Zukunft Bau".

Wir freuen uns, dass mit der vorliegenden Publikation über "Bewässerte Gründächer" ein weiterer sich in diese Thematik einreihender Forschungsbericht vorgelegt werden kann und die FLL-Schriftenreihe "Forschungsvorhaben" damit erweitert wird.

In der Süddeutschen Zeitung vom 23. April 2022 findet sich unter dem Titel "Über uns der Himmel" ein Artikel des bekannten Architekturjournalisten Gerhard Matzig über ein Studienprojekt an der TU München zum Thema "Über unseren Dächern".

Das Ergebnis ist ein Kompendium an Ideen, wie unsere Dächer einer ganz anderen Nutzung zugeführt werden könnten und das an ganz konkreten Orten in diversen deutschen Großstädten. Die Studierenden haben sich nicht nur Gärten auf den Dächern von Gebäuden ausgedacht, sondern auch Sportanlagen und andere Freizeitbereiche.

Die Bedeutung der Gebäudebegrünung als wichtige Komponente für eine klimaangepasste Stadtplanung ist auch bei Politikern in aller Munde. Man muss sich fragen, warum trotzdem nicht mehr und schneller etwas geschieht.

"Warum erobern wir nicht den Himmel und bauen eine Stadt über der Stadt", fragt Matzig, einen Artikel der FAZ zitierend. Die Antwort, sagt Matzig, bietet sich fast reflexhaft an, vor allem dann, wenn man seit Jahrzehnten mit den Akteuren der Immobilienwirtschaft vertraut ist. Die Antwort lautet: Dieser Branche fehlt es wie keiner anderen an Ideen.

Die FLL als "Regelwerksgeber der Grünen Branche" erstellt für den Bereich "Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung" schon seit rund 40 Jahren bundesweit geltende normative Richtlinien, passt diese regelmäßig dem Stand der Technik an und veröffentlicht sie in ihrer eigenen Schriftenreihe.

Der vorliegende Forschungsbericht ergänzt die FLL Dachbegrünungsrichtlinie um die Komponente der Bewässerung von Gründächern und gibt wichtige Hinweise zur damit verbundenen städtischen Niederschlagsbewirtschaftung und zur Steigerung der Verdunstungsleistung von extensiven Gründächern.

Die FLL dankt der Hochschule Neubrandenburg, namentlich dem Projektteam unter der Leitung von Prof. Dr. Manfred Köhler für die sorgfältige Bearbeitung des Forschungsvorhabens.

Unser Dank gilt auch dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat für die finanzielle Förderung des Projektes.

Ich wünsche der Publikation die verdiente Resonanz in der Fachwelt und hoffe, dass die Lektüre zur weiteren Realisierung begrünter Dächer beitragen wird.

Prof. Dr. Ulrich Kias  
Präsident der FLL

## Kurzfassung

Die städtische Aufwärmung und die Bildung von Hitzeinseln im urbanen Raum sind Themen wachsender Bedeutung. Die anhaltende Reduzierung von Vegetation im städtischen Raum, eine Zunahme von Extremwetterlagen und ein globaler Erwärmungstrend, stellen große Herausforderungen an den zukünftigen städtischen Raum dar.

Extensive Gründächer leisten einen bedeutenden Beitrag zur Reduzierung und Verzögerung von Starkregenabflüssen, binden Staub, verbessern die Luftqualität, reduzieren die Lärmbelastung, schaffen zusätzliche Freiräume und kühlen das Gebäude und den städtischen Raum durch die Verdunstungsleistung. Die städtische Erwärmung hängt signifikant mit dem Verlust von Vegetationsflächen zusammen. Die Verdampfungsenergie von 1 g Wasser beträgt 2.441 J/g, (bei 25 °C, Verdampfungsenthalpie 43,990 kJ mol<sup>-1</sup>, H<sub>2</sub>O: 18,02 g/mol), die Verdampfungsenergie von 1 kg Wasser beträgt demnach ~0,68 kWh. Konventionelle Gründächer leisten hier schon einen Beitrag mit ca. 1,5 kg Wasser pro m<sup>2</sup>/Tag, das entspricht ca. 0,94 kWh Verdampfungsenergie pro m<sup>2</sup>/Tag. Für Berlin (~4 Mio. m<sup>2</sup> Gründach) wären es ca. 4.082,73 MWh/Tag (4,08 GWh/Tag). Das ergibt für die gesamte Sommerperiode (pauschal 92 Tage, unabhängig der Verortung) demnach eine Verdampfungsenergie von 375,36 GWh. Für die Stadt München (~3,15 Mio. m<sup>2</sup> Gründach) ergibt sich eine Verdampfungsenergie von ca. 3,21 GWh/Tag der unbewässerten Gründächer und entsprechend 295,60 GWh in der Sommerperiode. Bei einer zusätzlichen und konstanten Bewässerung der Gründachflächen würden sich durchschnittliche Verdunstungswerte von 3,5 bis 5,3 kg/m<sup>2</sup>/Tag erreichen lassen. Durch eine aktive Bewässerung aller Gründächer würde sich somit in Berlin die Verdampfungsenergie (Kälteenergie) von ca. 375 GWh auf 881 bis 1.384 GWh in der Sommerperiode steigern lassen für München wäre eine Steigerung von 296 GWh auf 693 und 1.088 GWh in der Sommerperiode möglich. Die aufgebrachte Energie wird den lokalen Luftmassen entzogen und nicht zur weiteren Erwärmung der Luftmassen beitragen. Bewässerte Gründächer können daher die durch die Sonne eingestrahelte Energie in latente Wärme umsetzen. Die sensible Wärme wird vermindert.

Das Forschungsprojekt geht der Fragestellung nach, wie die Verdunstungsleistung von extensiven Gründächern, in anhaltenden Trocken- und Hitzephasen, durch eine zusätzliche Bewässerung gesteigert werden kann. Der Einsatz von wiegenden Kleinlysometern ermöglicht differenzierte Aussagen zu aktuellen Verdunstungsleistungen extensiver Gründächer. Insgesamt wurden 7 verschiedene Gründächer (unterschiedlicher Aufbauart) und ein Referenzkiesdach in das Monitoring aufgenommen. Das Ablaufverhalten von großflächigen Versuchsfeldern und deren Vergleich mit computergestützter Wassermodellierung fand ebenfalls Einzug in das Forschungsvorhaben.

Ergebnis der Arbeit ist, dass der Einsatz, insbesondere von Niederschlagswasser, als Beitrag zur städtischen Niederschlagsbewirtschaftung sinnvoll ist. Die Verdunstung über begrünte Dächer hat darüber hinaus positive Effekte zur Abkühlung aufgeheizter sommerlicher Wärmeinseln.



## Abstract

Urban warming and the formation of heat islands in urban areas are topics of growing importance. The continued reduction of vegetation in urban areas, an increase in extreme weather conditions and a global warming trend pose a major challenge to future urban space.

Extensive green roofs are already making a significant contribution to mitigate these effects, e.g. reducing and delaying heavy rainfall, binding dust, improving air quality, reducing noise, creating extra space and cooling the building and urban space through evaporation. Urban warming is significantly related to the loss of vegetation. The evaporation energy of 1 g of water is 2441 J / g, (at 25 ° C, evaporation enthalpy 43.990 kJ mol<sup>-1</sup>, H<sub>2</sub>O: 18.02 g / mol), 1 kg of water therefore requires ~ 0.68 kWh. Conventional green roofs already make a contribution of approx. 1.5 kg of water per m<sup>2</sup> / day, which corresponds to approx. 0.94 kWh evaporation energy per m<sup>2</sup> / day.

For Berlin (~4 million m<sup>2</sup> green roof) it would be approx. 4082.73 MWh/day (4.08 GWh/day). This results in an evaporation energy of 375.36 GWh for the entire summer period (overall 92 days, regardless of location). For the city of Munich (~3.15 million m<sup>2</sup> of green roof) there is an evaporation energy of approx. 3.21 GWh/day of the non-irrigated green roof and correspondingly 295.60 GWh in the summer period. With additional and constant irrigation of the green roof areas, average evaporation values of 3.5 to 5.3 kg/m<sup>2</sup>/day could be achieved. Active irrigation of all green roofs would increase the evaporation energy (cold energy) in Berlin from approx. 375 GWh to 881 to 1384 GWh in the summer period, for Munich an increase from 296 GWh to 693 and 1088 GWh in the summer period would be possible. The energy applied is withdrawn from the local air masses and does not contribute to further heating of the air masses. Irrigated green roofs can therefore convert the energy radiated by the sun into latent heat. The sensible heat is excellent.

The research project addresses the question of how the evapotranspiration performance of extensive green roofs, in continuous dry and heat phases, can be increased by additional irrigation. The use of weighing lysimeter allows differentiated statements on current evaporation performance of extensive green roofs. A total of 7 different green roofs (different body types) and a reference gravel roof were included in the monitoring system. The run-off behavior of large-scale trial fields and their comparison with computer-aided water modeling also found its way into the research project.

Results of this work are that the use, in particular of rainwater, as a contribution to urban rainwater management makes sense. Evaporation over green roofs also has positive effects on the reduction of the urban heat island effect.

# 1 Einführung und Motivation

Globale Herausforderungen wie der Klimawandel, ein notwendiges Ressourcenmanagement oder die Landflucht werden das Leben der Menschen verändern. Die rechtzeitige Anpassung von Städten an die veränderten Bedingungen können Schlüssel für eine positive Entwicklung werden. Dies gilt im Besonderen in Städten mit hohem Versiegelungsgrad (United Nations, 2015). Die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung mit ihren vielfältigen Maßnahmen kann bei richtiger Umsetzung Spitzenabflüsse und jährlich abfließenden Regenwassermengen in die Mischkanalisation (20-39 %) reduzieren. Die Belastung von Oberflächengewässern wird verringert, die Freiraumqualität und Biodiversität steigt, Grundwasserneubildung (26,7-83,2 %) wird initiiert. Die Verdunstung kann zwischen 9,5-19,1 % in der Simulation gesteigert werden (Matzinger et al.: 53.).

Konzepte des ökologischen Bauens, darunter die Bauwerksbegrünungen, wie etwa die extensive Dachbegrünung, können Lösungsansätze für einen Teil dieser Probleme sein, negative Umweltauswirkungen reduzieren und Umweltpassungen erleichtern. Im Folgenden werden diese erläutert.

**Tab. 1: Begrünte Dachflächen und deren Potentiale in Berlin und München**

		Anzahl/ Gebäude		Begrünte Dachflächen				Grundfläche der Gebäude		Prozentualer Anteil der potenziell begrünbaren Dachflächen (> 100 m <sup>2</sup> )	
				intensiv		extensiv					
			%	m <sup>2</sup>	%	m <sup>2</sup>	%	m <sup>2</sup>	%	%	m <sup>2</sup>
<b>Berlin</b> (Coenradie et al., 2016)	Begrünte Dachfläche vorhanden	18.368	3,0	605.507	0,6	3.397.176	3,3	11.847.831	11,5		
	Summe	604.865		4.002.682 / 3,9				103.299.727			
		<b>Anzahl/ Dachflächen</b>									
<b>Stadt München</b> (Ansel et al., 2015)	Begrünte Dachfläche vorhanden	59.082	19,5	3.148.043						10,5	13.233.965
	Summe	302.984		3.148.043 / 19,5							

Dachbegrünungen sind hier von besonderer Bedeutung und sollen im Folgenden näher untersucht werden. Beispielhaft sind hier Berlin und München zu nennen (siehe Tab. 1). In Berlin sind 3,0 % aller Gebäude begrünt, insgesamt 18.368 von insgesamt 604.856 Gebäuden (Stand 2016). Sie sind in der Lage, Spitzenabflüsse zu reduzieren, zurückzuhalten und verzögert in das Kanalnetz abzuleiten.

Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung kann eine Maßnahme sein, um bei Starkregenereignissen ein Überlaufen der Mischkanalisation zu vermeiden. Die großen Mischfrachtmengen führen zu einem erheblichen Schadstoffeintrag in Oberflächengewässer. Die technische Beseitigung dieser Stofffrachten ist aufwändig, teuer und ökologisch bedenklich. Der großflächige Einsatz von Dachbegrünungen als Maßnahme zum Regenwassermanagement wurde im Forschungsprojekt KURAS (Konzepte für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwassersysteme, 2013-2016; Tab. 2) eingehend für den Raum Berlin betrachtet. Hier konnte simuliert werden (Matzinger et al., 2016: 53), wie Spitzenabflüsse, Rückhalt, verzögerte Abgabe und Evapotranspiration Einfluss auf einen ganzen Stadtraum haben (siehe Tab. 2). Für die Quartiere in Berlin im Bezirk Pankow und Tempelhof-Schöneberg wurden jeweils drei unterschiedliche Maßnahmenkombinationen (EGR, Baumrigolen, offene Wasserflächen, Fassadenbegrünung, Betriebswassernutzung, teilversiegelte Oberflächen, Mulden-Rigolen-Systeme) erstellt. Die Maßnahmenkombination (A, B und C) wurden jeweils von unterschiedlichen Fachgruppen erstellt. In der

Maßnahmenkombination A wurden nur sporadisch dezentrale Maßnahmen geplant. In der Maßnahmenkombination B lag der Fokus auf einer hohen Verkettung von Maßnahmenkaskaden, die Gruppe C setzte in einem hohen Umfang verschiedene Formen der Bauwerksbegrünung ein. A und B berücksichtigte zudem zentrale Bewirtschaftungsmaßnahmen wie Retentionsbodenfilter und Stauraumaktivierung. Die Gruppe C setzte ausschließlich dezentrale Maßnahmen ein (siehe Tab. 2).

**Tab. 2: Simulierte Veränderung der Wasserbilanz zweier Quartiere in Berlin durch Maßnahmen der dezentralen RWB (Matzinger et. al., 2016: 53)**

	Menge [mm] im Ist-Zustand	Veränderung durch Maßnahmenkombination [%]		
		A	B	C
<b>Quartier in Pankow</b>				
<b>Abfluss</b>	252	-20,5	-30,8	-32,3
<b>Versickerung</b>	79	+26,7	+31,4	+27,8
<b>Verdunstung</b>	271	+9,5	+14,8	+19,1
<b>Quartier in Tempelhof-Schöneberg</b>				
<b>Abfluss</b>	294	-27,6	-38,0	-39,3
<b>Versickerung</b>	72	+54,5	+73,2	+83,2
<b>Verdunstung</b>	247	+12,8	+17,4	+17,3

## 1.1 Aufgabenstellung

In diesem Forschungsvorhaben ging es um die Bemessung und Auswertung der klimatischen Auswirkungen von Dachbegrünungen, einer bauphysikalischen Betrachtung, der Weiterentwicklung von bestehenden Monitoringsystemen zur Bemessung der Verdunstungsleistung von bewässerten und unbewässerten Gründächern an der Hochschule Neubrandenburg (siehe Abb. 1).

Die Dachbegrünung als Teil der grünen Infrastruktur nimmt eine immer größere Rolle in der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung ein. Urbane Räume weisen eine hohe Verdichtung auf, daraus resultiert eine verringerte Verdunstung, eine erhöhte thermische Strahlung und eine erhöhte sensible Wärme mit „urbanen Hitzeinseln“. Dabei könnte durch Verdunstungsleistung ein hoher Klimatisierungseffekt im urbanen Raum erzielt werden: 680 kWh Wärme werden bei der Verdunstung von einem m<sup>3</sup> Wasser der Umgebung entzogen. Die Adiabatische Kühlung ist dabei in der Lage, Kühlleistung ohne Abwärme zu generieren, wie es bei elektrischen oder gasbetriebenen Klimaanlage nicht möglich ist.

Der Fokus dieses Forschungsvorhabens lag auf der Quantifizierung der Verdunstungsleistung von extensiven Gründachaufbauten. Novum dieses Vorhabens ist die Maximierung der Verdunstungsleistung durch eine zusätzliche Bewässerung mit gesammeltem Regenwasser in Trockenperioden. Betrachtet werden in dem Vorhaben die Energie- und die Wasserbilanz von Gründachaufbauten. Diese kann je nach Substrat- und Pflanzenauswahl, sowie in Abhängigkeit der Vorsättigung, Temperatur und Einstrahlung divergent ausfallen.





**Abb. 1:** Blick über die extensiven Gründächer der Hochschule Neubrandenburg (Haus 2).

Um die verschiedenen Parameter (Substrat- und Pflanzenauswahl, Vorsättigung, Temperatur und Einstrahlung) zu beschreiben, kann auf einen Datensatz der Hochschule Neubrandenburg zurückgegriffen werden. Unveröffentlichte Rohdaten der Strahlungsbilanz von drei verschiedenen Gründachtypen und einem Referenzkiesdach liegen vor, sowie die Rohdaten von vier Großvolumenkippen (3 × Gründach, 1 × Kiesdach).

Die Datenreihen von insgesamt sechs Kleinlysimetern können zusätzlich verwendet werden. Die Daten von zwei Pyrradiometern mit einem elektrischen Widerstandsthermometer (Pt 100), zur Messung der Blocktemperatur, sind auf einem bewässertem Gründach und einem Referenzkiesdach in Betrieb. In Zusammenarbeit mit der Firma Optigrün (Mitglied der FBB) wurde eine wiegende Kleinlysimeteranlage aufgebaut und im August 2017 in Betrieb genommen. Die Pflanzen sind gut angewachsen, die Daten aus der Vegetationsperiode 2018 wurden für den Abschlussbericht verwendet.

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Forschungsvorhaben war die Optimierung der Wasserbilanz von extensiven Dachbegrünungen mit Hilfe einer aktiven Bewässerung. Zur Bemessung der Evapotranspiration wurden vier Kleinlysimeter (3 × Gründach, 1 × Kiesdach) mit einer aktiven und indirekten Bewässerung entwickelt, um in Trockenphasen den Stadtraum aktiv zu kühlen. Die Messtechnik wurde in Zusammenarbeit mit einem ansässigen Ingenieurbüro (Hanse Labs, Hochschule Neubrandenburg) entwickelt. Der Messclient besteht aus einem Einplatinencomputer (Raspberry Pi), der via WLAN die Daten direkt auf einen Server hochladen kann. Unter nahezu konstanten Bedingungen lassen sich verschiedene Wassergaben simulieren, um je nach Vorsättigung die Evapotranspiration und die Retention zu messen. Die pflanzenbezogene Verdunstungsleistung wurde mittels einer Gasanalyse bemessen und ist auch Bestandteil der Lehre an der Hochschule Neubrandenburg.



**Abb. 2:** Versuchsdachfläche der HSNB (Haus 3).

Eine mit dem Entwässerungsplanungsprogramm „STORM.XXL“ simulierte Ablaufmessung mit den virtuell nachgebildeten Versuchsdächern der HSNB unter Verwendung der real gemessenen Niederschlagswerte erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Praxispartner Sieker. Die Ergebnisse der Simulation wurden mit den real gemessenen Ablaufwerten verglichen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden im Kontext der zahlreichen aktuellen Veröffentlichungen nachfolgend diskutiert.

## 1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Durchführung des Forschungsvorhabens folgte im Wesentlichen den im Projektantrag beschriebenen Arbeitspaketen, Projektstart war der November 2016. Eine Übersicht des zeitlichen Ablaufs bzw. der Schlüsselveranstaltungen des Projektes ist in Tab. 3 zusammengestellt.

Im ersten Projekthalbjahr stand vor allem die Auswertung der Kleinlysimeter im Vordergrund. Erste Ergebnisse konnten im Rahmen einer Posterpräsentation (WGIC in Berlin) der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Die ausgewerteten Daten dienen als Vergleichsmessung der Verdunstungswerte von bewässerten Gründächern.

**Tab. 3: Folgender Zeit- und Meilensteinplan wurde in dem Forschungsvorhaben bearbeitet**

		Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
<b>AP 1</b>	<b>Analyse</b>	<b>M1 - M24</b>																								
1.2	Laborarbeiten und Analysen	M1-M22																								
1.3	Datenanalyse	M1-M12																								
1.4	Literaturrecherche	M1-M3																								
<b>AP 2</b>	<b>Messung und Simulation</b>	<b>M7 - M24</b>																								
2.1	Messung der Evapotranspiration mit 10cm Substratdicken	M1-M24																								
2.2	Messung der Evapotranspiration mit 16 cm Substrataufbauten	M1-M9																								
2.3	Messung der Evapotranspiration mit aktiver Bewässerung	M10-M18																								
<b>AP 3</b>	<b>Kalkulation</b>	<b>M1 - M19</b>																								
3.1	Bauphysikalische Analyse	M1-M19																								
3.2	Kosten-Nutzenrechnung von ext. GDs mit Bewässerung	M2-M19																								
<b>AP 4</b>	<b>Entwicklung bzw. Weiterentwicklung</b>	<b>M1 - M24</b>																								
4.1	Weiterführung der Messung an Kleinlysometern	M1-M24																								
4.2	Weiterentwicklung der Kleinlysometeranlage	M4-M9																								
<b>AP 5</b>	<b>Handlungsempfehlung</b>	<b>M1 - M22</b>																								
5.1	Erarbeitung eine Handlungsleitfadens	M22 - M24																								
<b>MS</b>	<b>Meilensteine</b>																									
MS 1	Projekttag I	M3			■																					
MS 2	Projekttag II																									
MS 3	Zwischenbericht	M12																								
MS 4	FBB-Seminar-Zwischenergebnisse & Konsultationen	M17																								
MS 5	FBR-Seminar	M18																								
MS 6	Abschluss-Bericht und Empfehlungen	M24																								

Aufgrund des kurzfristigen Projektbeginns im Herbst/Winter 2016, war eine Betrachtung der laufenden Vegetationsperiode nicht möglich. Dieser Aspekt war im Nachhinein betrachtet eher positiv zu bewerten, da so anders als ursprünglich im Projektantrag vorgesehen, sich nun zwei komplette Vegetationsperioden (2017 und 2018) betrachten ließen.

### 1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die extensive Dachbegrünung als Baustein des nachhaltigen Bauens erfährt in der internationalen Literatur eine große Beachtung. Im Fokus steht hierbei das Abflussverhalten von extensiven Gründächern. Ausgewertete Langzeitmessungen zum Wasserrückhalt sind rar und erstrecken sich über einen Zeitraum zwischen ein bis fünf Jahren (Kaufmann, 1999; Liesecke, 2002; Mann, 2000).

Die Abnahme der Evapotranspirationsleistung und eine höhere Temperatur an der Dachabdichtung als die Umgebungstemperatur in Trocken- bzw. Hitzeperioden (Onmura et al., 2001; Ouldboukhitine & Belarbi, 2015) sowie die zu erwartenden Extremwetterlagen stellen neue Herausforderungen für die Dachbegrünung dar. Die Forschungsberichte (Schafaczek, B., 2013; Minke et al., 2009) haben gezeigt, dass bereits bei extensiven Dachbegrünungen die Substrattemperatur eine geringere Schwankungsbreite aufweist als die Außentemperatur. Zudem zeigt die Speichermasse eine Phasenverschiebung der Höchsttemperatur von ca. 2 h gegenüber der Außenlufttemperatur. Die Forschungsarbeiten haben den positiven Einfluss eines extensiven Gründachaufbaus auf die Oberflächentemperatur der Dachabdichtung belegt. Dabei lagen die Bauteiloberflächentemperaturen im Referenzfeld (konventioneller Warmdachaufbau) im Maximum um mehr als 40 K über den Temperaturen in der Ebene der Abdichtungsbahn bei den Gründächern. Es konnte aber auch gezeigt werden, dass bei einem trockenen Substrat, infolge längerer Trockenperioden, die Temperaturen unter der Vegetationsschicht über den Außenlufttemperaturen liegen können.

Als Intelligente Systeme sind solche anzusehen, die ggf. vor einem zu erwartenden Starkregen die Retentionseinheiten leerlaufen lassen. Gründächer können hier als dezentrale Speichermöglichkeiten verstanden werden, die ähnlich wie ein Talsperren-management im landschaftlichen Stil Hochwasser abhalten sollen.

Weitere Steuerungsmöglichkeiten bestehen in der Auswahl eines besonders speicherfähigen Substrates. Die FLL-Dachbegrünungsrichtlinien 2018 bieten die Richtschnur: nur innerhalb der



Korngrößenzusammensetzung sind Variationen möglich, die nach den regional zu erwartenden Niederschlagsintensitäten und -mengen auszulegen sind (Hamouz et al., 2018). Akther et al. (2018) werteten 117 „peer reviewed“ Veröffentlichungen zur Retention aus den vier Klimazonen: Tropen, Trocken, Trockenwarm sowie kontinentales Klima mit Frostbedingungen aus. Einige dieser Arbeiten befassten sich mit mehreren Klimazonen. Ergebnis der Literaturstudie ist einerseits eine hohe Variation der Retentionsmittelwerte für Gründächer, zudem konnte eine durchschnittliche Retention von 60 bis 70 % gezeigt werden. Grund der starken Variation sind erhebliche bau- und situationsbedingt Abweichungen. Die Konsequenz der genannten Betrachtung ist, dass jeder Einzelfall separat optimiert an die jeweilige Situation durch Fachleute angepasst werden muss. Optimistisch an dieser Auswertung ist vor allem die Bestätigung, dass Gründächer als Retentionsmaßnahme in allen Klimazonen funktionieren können.

Gründächer leisten einen Beitrag zur Wärmedämmung von Gebäuden (Pianella et al., 2016). He et al. (2017) untersuchten die Faktoren Substratstärke und Blattflächenindex im Hinblick auf die Energiebilanz der Gründächer.

## 2 Formen der Dachbegrünung

Unter Gebäudebegrünung ist die Begrünung von Fassaden und Dächern auf Wohn- und Arbeitsgebäuden sowie alle anderen Arten von Gebäuden zu verstehen. In den folgenden Kapiteln werden zunächst die verschiedenen Formen der Dach- und Fassadenbegrünung vorgestellt.

### 2.1 Gründächer

Gründächer haben eine lange Tradition in der Baugeschichte. Die ersten Gründächer des Vorderen Orients sind in terrasserter Form aus den „Hängenden Gärten der Semiramis in Babylon“ bekannt (vgl. Schiemann, 2007). In skandinavischen Ländern gehören Erd- und Rasendächer bereits seit Langem zum Landschaftsbild und dienen durch ihre dämmenden Eigenschaften der Anpassung an die dort herrschenden klimatischen Bedingungen. Neben der Temperaturregulierung leisten die begrünten Dächer einen Beitrag zur Reduzierung der Brandgefahr (vgl. Köhler, 1993: 240). Als es um 1900 zu massenhaftem Wohnungsbau kam, wurden unter anderem in Berlin Gebäude mit Holzzementdächern gebaut. Dieser Vorgänger des Flachdachs wurde mit Teerpappe gedeckt. Auf die Teerpappe brachte man als Dach- und Brandschutzmaßnahme eine 5-15 cm dicke Sand- oder Kiesschicht auf. Auf dieser Dachbedeckung bildete sich eine Vegetationsschicht und es entwickelten sich sukzessive Dachbegrünungen, von denen später viele durch Sanierungen zerstört wurden (vgl. Köhler, 1993: 241). Anfang der 1980er-Jahre wurden neben dem Schutz der Dachhaut und dem Brandschutz weitere ökologische und städtebauliche Vorteile der Dachbegrünung erkannt (vgl. Drefahl, 1995: 10). Heute werden Dächer oft als fünfte Fassade eines Gebäudes betrachtet oder als zusätzliche Fläche in dicht bebauten urbanen Gebieten genutzt. Die Dachflächen können sehr unterschiedlich begrünt und damit auch vielfältig genutzt werden. Auf nationaler Ebene sind Gründächer im städtischen Raum etabliert. Das Potential von Dachbegrünungen ist dabei noch nicht erreicht, die Gründachfläche pro Einwohner schwankt zwischen 0,59-1,97 m<sup>2</sup> (Ansel et al., 2015) (siehe Tab. 4).

Tab. 4: Vergleich von Gründachanteil und Gründachfläche pro Einwohner

	München Gründachfläche > 20 %	Stuttgart Gründachfläche > 20 %	Karlsruhe Gründachfläche > 20 %	Nürtingen Gründachfläche > 20 %	Berlin Gründachfläche Gesamt
<b>Anzahl aller Dächer mit Dachbegrünung im Stadtgebiet</b>	51.147	16.2	2.308	729	
<b>Vegetationsfläche aller begrünten Dachflächen</b>	2.822.047m <sup>2</sup>	1.058.080 m <sup>2</sup>	177.546 m <sup>2</sup>	59.450 m <sup>2</sup>	4.002.682
<b>Gründachfläche pro Einwohner</b>	1,97m <sup>2</sup>	1,75 m <sup>2</sup>	0,59 m <sup>2</sup>	1,50 m <sup>2</sup>	1,12 m <sup>2</sup>

Die Nutzung erstreckt sich von extensiver bis intensiver Begrünung als Dachgarten oder Anbaufläche für Lebensmittel. In den nachfolgenden Abschnitten werden die extensive und intensive Dachbegrünung kurz vorgestellt. Abschließend werden die Vor- und Nachteile sowie die Auswirkungen auf das Gebäude und das direkte Umfeld beschrieben.

## 2.2 Extensive Dachbegrünung

Extensiv begrünte Dächer sind Flächen mit einem relativ geringen Bau-, Pflege- und Unterhaltsaufwand. „Bei geringem Gründachaufbau werden niedrig wachsende Pflanzen (Moose, Sukkulente, Kräuter, Gräser) verwendet, die sich weitgehend selbst erhalten und auch ohne bzw. bei geringer Pflege weiterentwickeln.“ (vgl. Köhler et al., 2012: 55). Bei der Pflanzenauswahl sollten Pflanzen gewählt werden, die für derartige Extremstandorte mit starker Sonneneinstrahlung und hohen Windgeschwindigkeiten geeignet und an diese angepasst sind (vgl. Köhler, 2012: 58). Der Grundaufbau einer extensiven Dachbegrünung kann aus einem ein- oder mehrschichtigen Aufbau bestehen. In beiden Fällen wird die Dachkonstruktion durch eine wurzelfeste Dachabdeckung und Schutzlage vor Beschädigungen geschützt. Bei einem mehrschichtigen Aufbau folgt auf die Schutzlage eine aus Festkörpern oder Schüttgut bestehende Dränschicht. Die im Schüttgut und dem Festkörper vorhandenen Hohlräume dienen der Aufnahme von überschüssigem Wasser aus der Vegetationsschicht (vgl. Kolb, 2016: 59). Das Wasser steht dort der Pflanze zu einem späteren Zeitpunkt zur Verfügung oder wird zwischengespeichert, bis es zeitverzögert vom Dach abgeleitet wird. Über der Dränschicht wird ein Filtervlies aufgebracht, das verhindern soll, dass das darüber befindliche Substrat in die Drainageschicht geschwemmt wird und diese verstopft (vgl. Kolb, 2016: 64). Abschließend befindet sich die max. 20 cm hohe Substratschicht mit der darüber liegenden Vegetationsschicht. Bei der Einschichtbauweise ist die Substrat- und Drainageschicht nicht voneinander getrennt (vgl. FLL-Dachbegrünungsrichtlinien, 2008: 39). Unabhängig vom Grundaufbau gibt es bei extensiven Dachbegrünungen eine Vielzahl von verschiedenen Systemen. Ein System ist die Direktbegrünung, die den Spontanbewuchs einer Fläche nutzt. Es werden Betonstein- oder Ziegelsteinelemente mit einer rauen, porösen und damit begrünungsfördernden sowie regenwasserzurückhaltenden Oberfläche auf die Dächer aufgebracht. Diese Fläche wird sukzessive von Moosen und Flechten durch Spontanbewuchs begrünt. Zum Schutz des Gebäudes muss eine Wassersperre und Dämmschicht in der Platte integriert sein, damit es zu keinen Wasserschäden in der Dachkonstruktion kommt (vgl. Pfoser et al., 2014: 62).

Die Begrünung eines Daches kann auch mittels eines Textilsystems erfolgen. Dabei werden vorkultivierte Moosmatten, die das Substrat ersetzen, auf die Dachabdichtung aufgebracht. Die Matten bestehen aus einem Wasserspeichervlies in Kombination mit einem dreidimensionalen Wirrgewebe, das als Vegetationsträger für Sedum und Moose dient (vgl. Pfoser et al., 2014: 64).

Eine Mischvariante aus Textil- und Substratschüttung ist das Textil-Substrat-System. Es ähnelt im Aufbau dem Textilsystem, enthält jedoch statt des Wirrgewebes eine organische Fasermatte, sowie eine darunterliegende Substratschicht. Diese Substratschicht sorgt für eine verbesserte Versorgung der Pflanzen in Trockenphasen.

Die Pflanzenauswahl kann erweitert werden und damit die Gestaltungsvielfalt für das Gründach vergrößern. Neben Moosen und Sedum ist auf den Textil-Substrat-Systemen auch die Pflanzung von Kleingehölzen möglich (vgl. Pfoser et al., 2014: 65). Die Substratschüttung von 5 bis 15 cm stellt die aufwändigste Form der extensiven Begrünung dar. Sie besteht oberhalb der Abdichtungsebene des Bauwerkes aus einer Schutz-, Speicher- und Entwässerungsschicht. Darüber befindet sich eine Substratschicht aus wasser- und lufthaltendem organischen Material, deren Dicke von der Art der verwendeten Pflanzen abhängig ist (vgl. Pfoser et al., 2014: 66). Im Vergleich zur extensiven Begrünung zeichnet sich die intensive Begrünung durch ein deutlich breiteres Pflanzen- und Gestaltungsspektrum aus. Sowohl in der Gestaltung als auch in der Morphologie orientiert sich die intensive Dachbegrünung an der Qualität des gewachsenen Bodens (vgl. FLL-Dachbegrünungsrichtlinien, 2008: 11). Von einer intensiven Begrünung spricht man ab einer Schütthöhe von 15 cm, jedoch kann die Substrathöhe auf ein und demselben Dach je nach Pflanzung deutlich variieren, weil Bäume und Gehölze gegenüber Rasen und Stauden eine dickere Substratschicht benötigen. Die intensive Begrünung ist auf Dächern mit einer Neigung bis maximal fünf Grad möglich (vgl. Pfoser et al., 2014: 67).

Der Aufbau einer intensiven Dachbegrünung gleicht mit der wurzelfesten Dachabdichtung, der zwischen Schutzlage und Filtervlies liegenden Drainage und der abschließenden Substrat- und Vegetationsschicht in den Grundzügen, dem Aufbau einer extensiven Begrünung. Die Pflanzen der intensiven Begrünung haben jedoch einen signifikant höheren Wasserverbrauch, als die Pflanzen auf einer extensiv begrünten Dachfläche, weshalb die Bewässerung von Intensivbegrünung notwendig ist. Deshalb befindet sich über der wurzelfesten



Abdichtung zum Schutz des Daches eine Wasseranstanwanne, in der das nicht direkt durch die Pflanzen und das Substrat verbrauchte Wasser zwischengespeichert werden kann, um der Pflanze zu einem späteren Zeitpunkt zur Verfügung zu stehen. Eine weitere Variante der Intensivbegrünung, die nur auf Flachdächern vorgenommen werden kann, ist die Begrünung mittels Pflanzgefäßen. Dadurch, dass die Gefäße nicht standortgebunden sind, können sie viel flexibler auf dem Dach eingesetzt werden und eignen sich auch beispielsweise als Raumteiler und als Strukturierungselement. Andererseits sind Pflanzgefäße deutlich anfälliger für Wind, wodurch entsprechende Maßnahmen zur Sicherung der Gefäße getroffen werden müssen. Im Vergleich zu dauerhafter Begrünung können in den Pflanzgefäßen auch nicht winterharte Pflanzen zum Einsatz kommen, die zur Überwinterung in geeigneten Räumen untergebracht werden müssen (vgl. Pfoser et al., 2014: 68).

### 2.3 Bewässerte Gründächer

Der ideale Wert von 5 l/m<sup>2</sup> und Tag wird häufig aus Wassermangel in der Substratschicht unterschritten. Die richtige Bepflanzung und die richtige Bewässerungssteuerung (siehe Tab. 5) sind die Voraussetzung, um einen optimierten sommerlichen Kühleffekt zu erreichen. Die eingesetzte Technik ist ähnlich der konventionellen Bewässerungstechnik aus dem Gartenbau. Dabei wird die Bewässerungstechnik in zwei Gruppen unterteilt (siehe Tab. 5).

Tab. 5: Übersicht zu den möglichen Bewässerungssystemen auf Dachbegrünungen.

	Einsatzbereich	Bepflanzung	Vorteile	Einschränkungen	Wartung
<b>Oberflurbewässerung</b>					
<b>Sprinklersysteme</b>	- intensive und extensive Dachbegrünung - großflächige Bewässerung	- niedrig (Sedum, Kraut, Gras)	- hohe Bewässerungsintensität ist möglich - nur wenig Sprinkler decken eine große Fläche ab - Zugänglichkeit - nachträglich zu Realisieren	- Verwehungen an den Dachrändern, Lichtkuppeln, Haustechnik - Versenkgrener lassen sich nachträglich nur schwer verbauen - Trittschäden - Dachneigung	- Nachjustierung der Auswürfe - Spülung des gesamten Systems - hohe Vorfiltrierung nötig
<b>Tröpfchenbewässerung</b>	- intensive und extensive Dachbegrünung - klein- bis großflächige Bewässerung	- niedrig (Sedum, Kraut, Gras) - mittelhoch (Stauden und Kleinsträucher) - hoch (Sträucher und Bäume)	- gezielte Bewässerung - Zugänglichkeit - nachträglich zu Realisieren - alle Dachformen	- Trittschäden - hohe Leitungs-dichte (50 bis 100 cm) durch die geringe Kapillarwirkung von Dachsubstraten	- jährliche Spülung - hohe Vorfiltrierung nötig
<b>Unterflurbewässerung</b>					
<b>Tröpfchenbewässerung (Matte, Drainelement)</b>	- intensive und extensive Dachbegrünung - klein- bis großflächige Bewässerung	- niedrig (Sedum, Kraut, Gras) - mittelhoch (Stauden und Kleinsträucher) - hoch (Sträucher und Bäume)	- gezielte Bewässerung - keine Trittschäden - keine UV-Belastung - hohe Langlebigkeit	- in der Planungsphase zu beachten - lässt sich schwer nachträglich verbauen	- jährliche Spülung - hohe Vorfiltrierung nötig

	Einsatz-bereich	Bepflanzung	Vorteile	Einschränk-ungen	Wartung
<b>Anstau und gedrosselter Ablauf</b>	- intensive und extensive Dachbegrünung - klein- bis großflächige Bewässerung	- niedrig (Sedum, Kraut, Gras) - mittelhoch (Stauden und Kleinsträucher) - hoch (Sträucher und Bäume)	- weite Dachflächen können angeschlossen werden (z. B. auf Tiefgaragen) - Bewässerung durch kapillaren Aufstieg - hohes Retentionsvolumen (60 -> 140 l/m <sup>2</sup> ) - starke Vorfiltrierung nicht nötig - keine Trittschäden - keine UV-Belastung - hohe Langlebigkeit	- auf Dachflächen mit 0° Dachneigung - in der Planungsphase zu beachten (hohe Lastaufnahme)	- bei reiner Anstaubbewässerung ohne Drossel sehr geringe Wartung - manuelle und automatische Drosseln müssen regelmäßig gewartet werden

### Automatisierung und Frequenz

Dünnschichtige Aufbauhöhen von extensiven Gründächern benötigen eine hohe Bewässerungsfrequenz. Sukkulenten können lange Trockenphasen (>30 Tage) ohne große Probleme überstehen. Gräser und Kräuter überstehen Trockenzeiten von über 14 Tagen. Je nach Substrataufbau und Auswahl kann die Bodenfeuchte über einen langen Zeitraum gehalten werden. Bei der Tröpfchenbewässerung ist eine hohe Frequenz nötig (z. B. 12 x 5 Minuten pro Tag) um eine komplette Durchfeuchtung des Substrates zu erlangen. Die Tropferabstände sind dabei so gering wie möglich zu wählen (15 cm). Je nach Bodenfeuchtegehalt ist eine automatisierte Bewässerung zu empfehlen, besonders bei der Verwendung von Trinkwasser. Sinkt die Bodenfeuchte unter z. B. 20 % v/v, so kann die Bewässerung den Bodenfeuchtegehalt wieder heben.

## 2.4 Sonderformen

Eine Sonderform der Dachbegrünung ist beispielsweise eine modulare Systembauweise oder die Dachbegrünung mit dem Hauptziel der Wasserretention. Bei modularen Systemen findet die Begrünung mit vorkultivierten Elementeinheiten statt. Diese können direkt auf die Dachabdichtung aufgebracht werden. Damit sind sie besonders schnell herstellbar und auch als temporäre Begrünung einsetzbar. Des Weiteren sind modulare Systeme in ihrer Gestaltung sehr variabel und können Pflanzenausfälle leichter kompensieren (vgl. Pfoser et al., 2014: 69). Die zweite Sonderform, das Retentionsdach, hat das Hauptziel des Regenwasserrückhaltes. Das Retentionsdach ist, ähnlich der Substratschüttung, mit einer Drainageschicht aufgebaut und kann Wasser entweder unter oder über dem Substrat führen und damit zurückhalten. Durch den Rückhalt des Regenwassers kommt es zum verminderten und verzögerten Regenwasserabfluss vom Dach, wodurch Extremwetterereignisse besser abgefedert werden können und es gleichzeitig zu einer Entlastung der Kanalisation kommt (vgl. Pfoser et al., 2014: 70f).

### 3 Stand der Technik

Ein hoher Versiegelungsgrad und fehlende Vegetationsflächen im städtischen Raum tragen dazu bei, dass das Stadtklima im Schnitt 4 K über dem des ruralen Umlands liegt (Kravčík et al., 2007). Innerstädtische Bereiche heizen sich auf und die Lebensqualität der Bewohner nimmt ab (Giguère, 2012). Die städtische Aufheizung und die Bildung von Hitzeinseln (Urban Heat Island Effect) haben direkten Einfluss auf die Stadtbewohner. Wachsende Städte bieten ein großes Potenzial, Vegetation in Form von Bauwerksbegrünungen im Stadtraum zu integrieren, die Ressource Wasser und die Verdunstungskälte besser zu nutzen.

Die innerstädtische Verdichtung der Bebauung wirkt sich negativ auf die Lebensqualität und Freiraumqualität der Städte aus. Das innerstädtische Grün wird immer weiter zurückgedrängt. Um die Lebensqualität der Städte zu verbessern, muss in der Planung die grüne Infrastruktur mehr berücksichtigt werden. Grüne Dächer bieten eine sinnvolle und nachhaltige Lösung, die sich positiv auf die Bewohner und Nutzer auswirken kann. Im folgenden Abschnitt werden einige Vorteile für den städtischen Raum aufgezeigt, die durch die Umsetzung von Gründächern im Stadtraum beeinflusst werden können (vgl. Kolb, 2016: 133).

#### Überblick zu den Nachteilen der Gebäudebegrünung

- Zusätzliche Dachlast (0,5 bis 1,5 kN/m<sup>2</sup> bei extensiven und ca. 1,5 bis 10 kN/m<sup>2</sup> bei intensiven Begrünungen);
- Mehraufwand in der Planungsphase;
- Zu Beginn höherer Investitionsbedarf (ext. Gründach ca. 65,00 €/m<sup>2</sup>, Bitumendach ca. 41,00 €/m<sup>2</sup>);
- Zusätzlicher Pflegeaufwand (ext. Gründach ca. 0,60 €/m<sup>2</sup>/Jahr, Bitumendach ca. 0,25 €/m<sup>2</sup>/Jahr).

Die Vor- und Nachteile der Dachbegrünung an Gebäuden und im Quartier werden oft als Argumente für beziehungsweise gegen Gebäudebegrünung genutzt. Überwiegend werden ihre positive Wirkung auf das unmittelbare Umfeld des Gebäudes als aber auch für das städtische Umfeld verwendet. Begrünte Gebäude haben der traditionellen Dachbedeckung gegenüber viele Vorteile, aber auch Nachteile. Aus städtebaulicher Sicht sind Gründächer von Vorteil, weil sie Grün- und Freiflächen ins Stadtbild bringen, ohne dafür zusätzliche Flächen in den ohnehin schon dichtbesiedelten Gebieten zu beanspruchen. Des Weiteren können Dachbegrünungen zur Gestaltung des Stadtbildes beitragen, weil sie eine gliedernde, akzentuierende oder raumbildende Funktion haben (vgl. FLL-Dachbegrünungsrichtlinien, 2008: 16). Dachbegrünungen leisten zusätzlich einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des Wohn- und Arbeitsumfeldes, indem beispielsweise der Blick aus dem Büro- oder Wohnungsfenster auf eine begrünte Fläche anstatt auf eine konventionelle Dachbedeckung fällt. Dachbegrünungen können abhängig von ihrer Lage und Beschaffenheit auch zur Lärminderung in der Stadt beitragen. In Untersuchungen wurde belegt, dass abhängig von der Dachform und der Dachbegrünung eine Lärmreduktion von bis zu 7,5 dB in engen Hinterhöfen erreicht werden kann (vgl. van Rentergheim et al., 2013: 41). Ökologisch haben Gründächer den Vorteil, dass sie den Regenwasserabfluss von Dächern verringern und verzögern, wodurch ein Teil des Regenwassers durch Verdunstung wieder in den natürlichen Wasserkreislauf eingebracht wird. Gleichzeitig wird die städtische Abwasserentsorgung bei Starkregen durch den verzögerten Abfluss entlastet. Zusätzlich tragen Gründächer zur Verbesserung des innerstädtischen Kleinklimas bei (vgl. Krupka, 2001: 26). Sie gleichen starke Tag- und Nachttemperaturschwankungen aus, wodurch die Dächer im Tagesverlauf eine ausgeglichene Temperaturamplitude aufweisen. An der UfaFabrik in Berlin konnte das im Jahr 2001 mittels einer Messung exemplarisch nachgewiesen werden: Die tagsüber auf einem Bitumendach gemessene Oberflächentemperatur betrug ca. 55 °C, wohingegen die gemessene Temperatur auf dem Gründach nur ca. 30 °C betrug. Nachts wurde auf den gleichen Dächern der Effekt beobachtet, dass sich das Bitumendach deutlich stärker abkühlte als das Gründach. Es konnte ein Temperaturamplitudenunterschied zwischen Bitumen- und Gründach von ca. 30 K gemessen werden (vgl. Stefan et al., 2010: 30). Die Energiebilanz eines Gründaches ist im Vergleich zu einem Bitumendach deutlich besser. Das lässt sich durch einen Vergleich der

Umwandlung der Globalstrahlung verdeutlichen. Bitumendächer wandeln ca. 95 % der Globalstrahlung in Wärme um, wohingegen bei einem extensiv begrüntem Dach ca. 58 % der Strahlung in Verdunstungskälte umgewandelt wird (vgl. Stefan et al., 2010: 16).

### 3.1 Evapotranspiration im urbanen Raum

Im Verdunstungsprozess der Evapotranspiration (ET) wird flüssiges Wasser in Wasserdampf umgewandelt, dabei reduziert sich das Wasser von der Verdunstungsfläche. Um den Aggregatzustand der Wassermoleküle zu ändern, ist Energie erforderlich. Hauptlieferant der Energie ist die direkte Sonnenstrahlung und zu einem geringen Maße die Umgebungstemperatur der Luft. Der Wasserdampf wird durch die Differenz zwischen dem Wasserdampfdruck an der Verdunstungsoberfläche und dem Wasserdampfdruck der umgebenden Atmosphäre erzeugt. Während des Verdunstungsprozesses wird die umgebene Atmosphäre mit Wasserdampf gesättigt und der Prozess verringert sich, bis er ganz zum Stillstand kommt. Um den Verdunstungsprozess aufrecht zu erhalten, ist ein Austausch der feuchten Luft mit trockener Luft notwendig. Beschreibende klimatologische Parameter sind bei der Beurteilung für den Verdunstungsprozess: die Sonneneinstrahlung, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit.

In der Evapotranspiration von extensiven Dachbegrünungen spielt außerdem die exponierte Lage mit geringer Verschattung der Bodenoberfläche eine Rolle. Der geringe Substrataufbau von extensiven Einbauten und dem einhergehenden geringen Bodenwasserhaushalt lässt die Oberfläche des Bodens austrocknen und im Oberboden nimmt die Feuchtigkeit ab, die Evapotranspiration verringert sich und kommt ganz zum Erliegen. Die aktuelle Evapotranspiration ( $ET_a$ ) von extensiven Gründachaufbauten können z. B. mit Retentionsboxen und einer künstlichen Kapillarsäule länger aufrechterhalten werden, wie auch durch eine zusätzliche künstliche Bewässerung.

Die ET setzt sich aus der Bodenverdunstung und der Transpiration zusammen, je nach Auswahl und Dichte der Pflanzenarten ist dieser Effekt steigerungsfähig (Ouldboukhitine & Belarbi, 2015).

Die generelle Bedeutung der ET im Hinblick auf die Temperaturveränderung auf der Erde kann mit Satellitenbetrachtungen beschrieben werden. Begrünte Teile der Erde haben eine erhöhte ET, weisen geringere Temperaturen auf und speichern  $CO_2$  (Zeng et al., 2018). Das bietet Hoffnung für überhitzte Städte, wenn sie im größeren Umfang mit Dachbegrünungen ausgestattet würden.

Vorhandene Berechnungsmöglichkeiten der ET benötigen noch gewisse Anpassungen, um aus den Monatswerten von Messstationen auch für Stadtgebiete valide Ergebnisse zu generieren (DiGiovanni et al., 2018). Methodisch ist die Ermittlung einer exakten ET von einer Vielzahl sehr empfindlich einzustellender Messgrößen immer noch eine technisch herausfordernde Herangehensweise (Zhang et al. 2019) aufgrund entsprechend mehr oder weniger relevanten Abweichungen zwischen Messungen und Rechenmodellen mit Klimaparametern (Straatmann et al., 2018, Hui-Mean et al., 2018).

Wang et al. (2018) betonen die Bedeutung von ET über den Aspekt möglicher Verknappung austrocknender Landschaften, die einen Kreislauf im Hinblick auf die Versalzung von Böden zur Folge haben können. Den kleinen lokalen Wasserkreislauf durch richtige Pflanzenauswahl zu stärken, ist hier eine Lösung. Die Bedeutung der Verdunstung für die Reduktion der weiteren Aufheizung der bodennahen Luftschicht wird unterstrichen.

Eigenen Messungen in Neubrandenburg ergaben sommerliche Verdunstungswerte von etwa 3 mm, die sich unter günstigen Umständen auf 6 mm steigern lassen. Die gemessenen Werte der maximalen Verdunstungsleistung von extensiven Gründächern lassen sich näherungsweise in zahlreichen Arbeiten nachlesen. Ali-Butar (2018) berechnete beispielsweise durchschnittliche ET-Werte in der Größenordnung von 3-7 mm unter trockenwarmen Bedingungen. Feng et al. 2018 zeigt auf, dass es ein wesentlicher Unterschied ist, ob es sich um Sedum oder Grasflächen handelt. Das konnte auch in Neubrandenburg durch sommerliche IR-Messungen über dem typischen Sedumdach im Vergleich zum Gras-dominierten Dach festgestellt werden: Die Grasflächen verdunsten im Sommer deutlich mehr. Die reale/aktuelle ( $ET_a$ ) und die potentielle Evapotranspiration ( $ET_p$ ) weichen in den Sommermonaten um 30-80 % ab. Hier wäre eine Bewässerung eine effektive Möglichkeit zu Steigerung.

Untersuchungen aus Norditalien bestätigen, dass beim Vergleich der potentiellen und der aktuellen Verdunstungen ganzjährig eine zusätzliche Steigerung möglich ist, die jahreszeitlich im Durchschnitt zwischen 1-3 mm täglich variiert (Palla et al., 2018).

Gkatsopoulos (2017) entwickelte eine Simulationsrechnung zur Abschätzung der Verdunstungskälte durch ET. Auf der Basis von Stundenwerten kann mittels der Penman-Montieth Kalkulation der Effekt abgeschätzt werden. Hiermit steht ein Instrument zur Verfügung, um auch die Veränderung von unbegrünten Dachflächen zu begrünten Dächern für Städte abzuschätzen.

Jahanfar et al. (2018) weisen auf die möglichen Schwächen von Berechnungsformeln zur ET von extensiven Gründächern hin. Diese sind besonders gravierend, wenn Wasserstress vorliegt und die  $ET_p$  über der  $ET_a$  liegt. Cascone et al. (2019) untersuchen die wesentlichen Kriterien, die zur Steigerung der ET beitragen: Wassergehalt, Stomatawiderstand der Pflanzen (errechneter Wert zur Bemessung der Wasserabgabe durch die Pflanze an die Atmosphäre), Blattflächenindex, Einstrahlung, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte, Bodenstärke und Bodenart. Genannte Autoren kommen zum Ergebnis, dass die überwiegenden Aufsätze eher theoretische als messtechnische Ansätze liefern und, dass diese Diskrepanz nur durch weiterführende Untersuchungen geklärt werden kann.

Die in diese Arbeit durchgeführten Untersuchungen mit entsprechend unterschiedlich starken Substraten und vor allem unterschiedlichen Retentionselementen trägt dazu bei, diese Informationslücke zu schließen.

Für die Erhöhung der Verdunstung wäre es positiv in größerem Umfang höhere Substrataufbauten und/oder eine zusätzliche Bewässerung zu verbauen zu verbauen. Entsprechend befürworten Lee et al. (2018) mehr intensive Dachbegrünungen mit entsprechendem Gehölzbestand.

Es ist zu prüfen, aus welcher Ressource die Bewässerung zur Erhöhung der Verdunstungsleistung genutzt werden kann. Sowohl Regenwasser als auch Grauwasser sind gute Ressourcenoptionen (van Mechelen et al., 2015).

### 3.2 Biodiversität

Extensive Dachbegrünungen sind oftmals Extremstandorte. Die extensive Dachbegrünung ermöglicht durch ihre spezielle Charakteristik: Substratdicken zwischen 8-16 cm, einer exponierten Lage kompletter Durchtrocknung und geringem Nährstoffgehalt eine Zunahme der Biodiversität an diesem neuen Extremstandort. Die Habitatvielfalt und die Konnektivität einzelner Habitate können durch den Einsatz von extensiven Gründächern (bewässerten und unbewässerten) zunehmen. Langzeituntersuchungen hierzu laufen an der Hochschule Neubrandenburg seit über 13 Jahren. Weltweit wurden bisher über 650 verschiedene Arten auf Gründächern nachgewiesen.

Je nach Bautyp, Substrathöhe, Nährstoffversorgung, Ausrichtung, Relief, Bepflanzung und zusätzlicher Bewässerung kann die Biodiversität im Vergleich zu einer typischen Sedum-dominierten Bepflanzung deutlich vielfältiger sein (siehe Abb. 3), auch eine hohe Artenanzahl zu Beginn kann über einen langen Zeitraum eine hohe Artenanzahl erhalten.



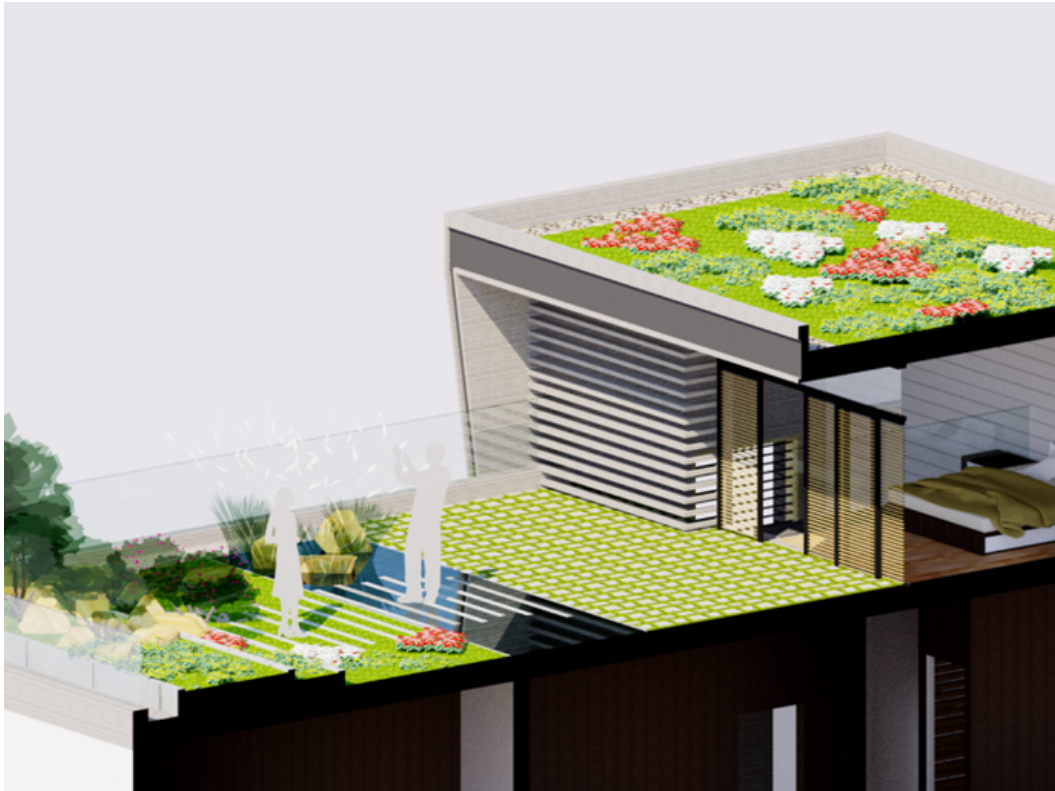


Abb. 3: Möglichkeiten zur Steigerung der Biodiversität auf Dachflächen.

### 3.3 Aktive Verbesserung von Pflanzenwachstum durch höhere Speicherung, lokale Anpassungen der Bauweisen

Ähnlich zu den an der HSNB durchgeführten Versuchen zu bewässerten Gründächern, wurden auf einem Dach in Amsterdam Bewässerungsversuche zu Gründächern durchgeführt. Es wurden Bewässerungs- und Speicherungsversuche mit 30 bzw. 80 mm (Liter pro m<sup>2</sup>) in dem Zeitraum Juni 2017 bis Mai 2018 durchgeführt. Sie trugen zu einer wesentlichen Reduktion des möglichen Wasserstresses der untersuchten Pflanzungen „Sedum“ und „Gräser-Kräutermischung“ bei (Cirkel, 2018). Bei den Versuchen an der HSNB wurde eine gemischte Pflanzung verwendet, die optimiert auf beide Situationen von trocken bis feucht angepasst reagieren kann. Allerdings zeigte sich im doch relativ feuchten Jahr 2017 eher ein Kümmeren (geringes Pflanzenwachstum, Chlorosen) bei dem Sedum, im trockenen Jahr 2018 wirkten sich die zusätzlichen 3 x 30 mm (Liter pro m<sup>2</sup>) überlebenswichtig für die Pflanzen beider Pflanzgruppen aus. Der erhöhte Retentionsraum bei einigen der Lysimeter hilft, etwa eine Woche lang den Wasserstress abzuwenden.



**Abb. 4:** Ehemalige Versuchsdachfläche in Tornesch. Die Vegetation hat fast 15 Jahre keine Pflege erhalten.

Lokal angepasste Substrate können ebenfalls zur Erhöhung der Wasserspeicherung oder Gewichtsreduzierung beitragen, hier ist noch einiges kreatives Experimentieren möglich/nötig. Kazemi und Mohorko, (2017) betonen die Bedeutung der regional angepassten Substratauswahl für die besondere Retentionsfunktion des Aufbaus. Vijayaraghavan und Joshi, (2015), verwendeten Seegrass als besonderes Speichermedium. Kokosfasern sind in den Tropen ein ebenfalls erfolgreich getestetes Speichermedium. Köhler und Kaiser (2018) konnten auf einem ehemaligen Versuchsdach der Fa. Optima, nach 15 Jahren nahezu ohne Pflege, von 92 der damals gepflanzten Arten noch 62 Arten nachweisen (siehe Abb. 4). Eine Reduzierung der Artenvielfalt konnte Ksiazek et al. (2018) auf 13 extensiven Dachbegrünungen im nordöstlichen deutschen Raum über einen Zeitraum von 13 Jahren nicht feststellen.

Li et al. (2018) untersuchten die Auswirkung unterschiedlichen Aufwuchses auf die Retentionsleistung bei unterschiedlich intensiven Niederschlagsereignissen. Besonders gute Effekten hatte ein üppiger Grasbestand aus *Festuca arundinacea* (Rohr-Schwingel) im Vergleich zu weniger effektiven niedrigwüchsigen Kräutern. Die Wirkung kann auf zusätzliche ET und Retention aufgeteilt werden.

### 3.4 Wirkung auf das Gebäude und das Umfeld

In Zeiten hoher Außenlufttemperaturen kann der hygienisch erforderliche Luftwechsel im Innenraum nur durch die Zufuhr von warmer Außenluft gedeckt werden. In Verbindung mit den solaren Einträgen in den Innenraum und den internen Wärmelasten (durch den Nutzer) führt dies zu einem Anstieg der Raumtemperaturen. Bei Räumen mit einer geringen thermischen Speichermasse (üblich für Dachgeschossausbauten) oder länger anhaltenden Hitzeperioden (Aufheizung der Gebäudehülle) kann dies zu hohen Innenraumtemperaturen führen, die vom Nutzer als unbehaglich empfunden werden und eine verminderte Leistungsfähigkeit bedingen. Aus energetischer Sicht kann das Gesamtsystem der intensiven, in Teilen auch der extensiven Dachbegrünung, als regeneratives Kühlreservoir (ähnlich dem Erdreich) begriffen werden, auf das in Zeiten hoher Außenlufttemperaturen bzw. hoher außenliegender Strahlung zurückgegriffen werden kann. Das ist besonders interessant für die sommerliche Konditionierung von natürlich belüfteten Innenräumen, in denen nur mit dem Temperaturniveau des Außenklimas gelüftet werden kann.

Eine der aktuelleren Metaanalysen zum Aspekt der energetischen Effekte begrünter Fassaden- und Gründächer ist die Arbeit von Besir et al. (2018). Um einen besonders hohen Dämmeffekt zu erzielen, sind intensive Dachaufbauten mit üppiger Gehölzvegetation zu empfehlen. Laut dieser Studie machen Dächer etwa 25 % der städtischen Oberflächen aus. In den zitierten Studien wird eine Reduktion des Energiebedarfs zwischen 10 und 37 % des Heizenergiebedarfs erreicht, der Kühlbedarf in den Tropen kann um 50-90 % gesenkt werden. Xu et al. (2018) ermittelten mit Lysimetern die durchschnittlichen ET von Mais (5 mm, im Vergleich Gras 3 mm und als Faustwert 10 mm für Wald). Eine vergleichbare Untersuchung mit Lysimetern wurde in Norwegen durchgeführt (Johannessen et al. 2017) mit dem Ergebnis hoher Retentionswerte im Sommer und geringerer Verdunstungswerte in Trockenperioden.

Mit einem Gründach entstehen Verdunstungspotentiale. Gründächer sind meistens so konzipiert, dass sie möglichst viel Niederschlagswasser speichern. Das im System gespeicherte Wasser wird dann mittels Verdunstung über Substrat und Vegetation abgegeben (vgl. Kolb, 2016: 134). Ein Gründach mit einem Dachgarten schafft eine zusätzliche nutzbare Fläche für Bewohner oder Nutzer eines Gebäudes und steigert so die Attraktivität und Freiraumqualität. Aber das ist nicht der einzige Vorteil auf der Gebäudeebene. Bei extensiven Gründächern, die keiner erweiterten Nutzung zugeführt werden, schützt das Gründach die Dachhaut vor extremen Umwelteinflüssen wie Spitztemperaturen im Sommer und Winter sowie extremen Wetterereignissen wie Hagel und Sturm und macht diese somit haltbarer (vgl. Mann, 2013: 85ff). Des Weiteren verschatten die Pflanzen die Dachfläche. Dies bringt durch die daraus entstehende Evapotranspiration einen Kühlungseffekt, der noch bis zu einem Meter über der Bepflanzung nachzuweisen ist. Dieser Kühlungseffekt wird durch den Wind noch einmal verstärkt. Der Wind wird zum einen durch die Pflanzen verwirbelt und nimmt die gekühlte Luft vom Dach mit hinunter und kühlt über diesen Weg auch umliegende Flächen. Außerdem dient eine Dachbegrünung mit hohem Deckungsgrad, bedingt durch die diversen verbauten Schichten als Isolation (vgl. Coma et al., 2018: 114ff). Die eigene Arbeit (Köhler und Malorny, 2009) ergab für die Heizperiode in Nordost-Deutschland etwa 4 % Einsparung bei dem hier untersuchten typischen extensive Gründächer (EGD) mit max. 10 % Substratstärke. Es spricht vieles dafür, zukünftig stärkere Aufbaudicken, also auch Intensivbegrünungen aus Klimaschutzgründen zu bauen. Boden und Wasserspeicherung sind die wesentlichen Stellgrößen, um ein Gründach zu einem energetischen Speicher zu formen (Tian et al., 2017). Coma et al. (2017) kommen zum Ergebnis, dass begrünte Dächer ihre energetische Funktion auf drei Weisen erfüllen: Verschattung (aber ständig wechselnd), zusätzliche Isolation (Aufbaustärke und darin enthaltener Wassergehalt) sowie Wärmespeicherkapazität.

Arkar et al. (2018) untersuchten den Wärmedurchfluss (Ort: Stockholm und Montreal) durch leichtgewichtige Gründachaufbauten (6 cm Substrataufbau), im Gegensatz zur Variante ohne Gründach. Als Referenzdachaufbauten diente ein Leichtbaudach ( $U = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) und einem Dachaufbau mit einem U-Wert von  $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Der latente Wärmespeicher führte zu einer Verringerung der Wärmeverluste im Winter um etwa 5 bis 20 %.

Gründächer strahlen deutlich weniger sensible Wärme ab, weshalb sich die Umgebung eines Gründaches weniger erhitzt und damit in einem geringeren Umfang zur Entstehung von urbanen Hitzeinseln beiträgt. Die zusätzlichen Gründachflächen leisten zudem durch die Resorption von Abgasen und ihrer Photosyntheseleistung einen Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität bzw. Verringerung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes. Die Begrünung fungiert auch als Schutz vor mechanischer und physikalischer Beanspruchung des Daches, weil die Pflanzen- und Substratschicht die Dachabdichtung vor ultravioletter Strahlung und starken Temperaturunterschieden schützt, die mit der Zeit zu einer schnelleren Alterung der Dachhaut beiträgt (vgl. FLL-Dachbegrünungsrichtlinien, 2008: 17). Die Lebensdauer von Bitumendächern wird auf ca. 30 Jahre geschätzt, die von Dachbegrünungen eher auf 40 Jahre. Es gibt in Deutschland aber auch Gründächer, die bereits über 100 Jahre alt sind. Dachbegrünung hat je nach Aufbau neben der Funktion als Erholungs- und Nutzfläche für den Menschen auch eine Funktion als Lebensraum oder ökologischer Trittstein.

Als Nachteil der Begrünung gilt, dass bereits bei der Planung ein erheblicher Mehraufwand durch die Berücksichtigung der zusätzlichen Wasser-, Pflanzen- und Substratlast entsteht. Nach der Fertigstellung kann die Begrünung nicht einfach sich selbst überlassen werden, sondern muss mit regelmäßigem Pflegeaufwand und Kontrollgängen überwacht werden. Substratverwehungen, das Zusetzen von Abflüssen und Beschädigungen am Dach können durch wiederkehrende Kontrollen frühzeitig erkannt und behoben werden. Ebenfalls einen Nachteil gegenüber einer konventionellen Dachdeckung stellt die aufwändige und teurere Lokalisierung und Behebung eines Schadens dar (vgl. Krupka, 2001: 27f), speziell auch der Bewässerungstechnik. Schäden an der Dachhaut sind meistens vorhergegangenen Planungs- oder Ausführungsfehlern geschuldet.

Ein weiterer Vorteil für das nahe Umfeld von Gründächern ist, dass die Feinstaubbelastung der Luft durch Gründächer reduziert werden kann. Da Pflanzen die Luft auf natürliche Weise reinigen, kann ein vermehrter Einsatz von Gründächern auf zumeist ungenutzten Flächen einen Vorteil bringen und das städtische Grün bereichern, jedoch nicht ersetzen (vgl. Rowe, 2018: 146). Gründächer mindern die Lärmbelastung in und nahe an Gebäuden (vgl. Renterghem, 2018: 177f). Der Schall wird über Entfernungen vermindert, durch Reflektion gestreut und durch Absorption gedämpft (vgl. FLL-Dachbegrünungsrichtlinien, 2014: 155). Durch die verschiedenen Pflanzen, die auf Dachflächen ausgebracht werden, erhöht sich die Biodiversität in den Städten. Flora und Fauna können je nach Strukturierung des Gründachs diese als Trittsteinbiotop oder Grünkorridor nutzen (vgl. Köhler und Ksiazek-Mikenas, 2018: 247). Den größten Vorteil macht jedoch das Rückhaltevermögen eines Gründachs aus, welcher im nächsten Kapitel ausführlicher beschrieben wird.

### 3.5 Wirkung im Stadtraum

Neben der Verbesserung der Stadtatmosphäre und dem Entgegenwirken von Wärmeinselbildung ist der größte Nutzen von Dachbegrünungen die Retention von Regenwasser.

Die innerstädtische Verdichtung und die Vielzahl von Starkregenereignissen bringt die Siedlungsentwässerung immer mehr an die Grenzen der Belastbarkeit. Planer versuchen hier mit Bauwerken wie Regenrückhaltebecken, Regenüberläufen und Stauraumkanälen entgegenzuwirken. Trotzdem gibt es immer häufiger Nachrichten von überfluteten Kellern, Straßen und Bauwerken. Bei manchen Starkregenereignissen gelangt sogar verschmutztes, ungereinigtes Wasser in die Vorflut und gefährdet so die Trinkwasserreservoirs. Vollversiegelte Flächen sind meistens so konzipiert, dass 70-90 % des anfallenden Regenwassers innerhalb kürzester Zeit in die Kanalisation abgeleitet wird. Um solche Abflussspitzen zu reduzieren, gibt es Möglichkeiten Regenwasser zurückzuhalten und/oder verlangsamt in die Kanalisation einzuleiten oder gar zu versickern. Gründächer bieten hier eine gute Möglichkeit (vgl. Kolb, 2016 :134). Es gibt Gründach-Systemlösungen, die bis zu 91 l/m<sup>2</sup> im Substrat und 140 l/m<sup>2</sup> in einer Wasserretentionsbox auf dem Dach speichern können. Dieses gespeicherte Wasser kann dann durch integrierte Kapillarsäulen zurück ins Substrat geleitet werden und dient so der Bewässerung der Vegetation und erhöht die Verdunstungsleistung. Außerdem gibt es die Möglichkeit, das Wasser gedrosselt abzuleiten. Aber auch einfache Extensivbegrünungen helfen bei der Entlastung von Abwassersystem. Das anfallende Regenwasser, welches auf Gründächer fällt, wird zuerst im Substrat gespeichert und so den Pflanzen zur Verfügung gestellt. Das dann

noch überschüssige Wasser wird mit einer Verzögerung (je nach Substratstärke) von bis zu 24 Stunden an die Kanalisation abgegeben (vgl. Abb. 5).

Eine aktive Bewässerung auf Gründächern ermöglicht eine größere Pflanzenvielfalt: Höhere Pflanzen, selbst Sträucher sind möglich und dadurch auch eine Kammerung und Bildung von „Räumen“ auf Dachflächen. Sowohl die Aufenthaltsqualität als auch die kleinklimatische Wirkung können durch bewässerte Gründächer gegenüber konventionellen Gründächern maßgeblich erhöht werden.

### 3.6 Einfluss der Alterung auf das Retentionsverhalten

Entscheidend für die Retentionsfunktion eines Gründachs ist zu Beginn die Auswahl der richtigen, leistungsfähigen Substrate (Sandoval et al., 2015).

Über die Jahre kann es mit zunehmender Verdichtung, höherem Pflanzenwuchs und Rückgang der Nährstoffe im Substrat Leistungsverschiebungen geben, die u. a. durch Nachdüngung oder Substratbearbeitung ausgeglichen werden können. Viele Veröffentlichungen empfehlen der Leistungsverschiebung ab dem 12. Monat entgegenzuwirken (De-Ville et al., 2018). Eigene Erfahrungen an 2 Jahrzehnte alten Dächern in Berlin (Köhler und Poll, 2010) zeigte jedoch, dass sich mit der typischen Stechzylindermethode noch keine gravierenden Veränderungen aus solch einem Zeitraum ergeben, die sich nachteilig auf die Leistungsfähigkeit auswirken.

### 3.7 Kühlungseffekt/Energetische Aspekte

Olivieri et al. (2017) stellten die besonders gute Verdunstungsleistung, etwa feuchter Oberflächen an begrünten Fassaden in den Vordergrund. So etwas ist auch mit den bewässerten Gründächern möglich. Gebäudebezogen sind hier architektonische Lösungen denkbar, die einzelne Bereiche eines Daches als „besondere Verdunstungsflächen“ sommerlich überstauen und damit Kühlinseln mittels zwischengespeicherten Regen- oder Brauchwassers schaffen.

Zeng et al. (2017) quantifizieren den jährlichen Einsparungseffekt für unterschiedliche klimatische Provinzen Chinas. Abhängig von der Bauweise konnten in Bezug auf Heizen und Kühlen der Gebäude eine Einsparung von 4-11 % durch begrünte Dächer nachgewiesen werden. Die Bewässerung der Gründächer wird als einer der zentralen Aspekte zur Erhöhung der thermalen Funktion von Gründächern angesehen (Tan et al., 2017). Die Feinsteuerung der städtischen Kühlung ist durch natürliche Ventilation und Luftströmungen an z. B. begrünten „cool roofs“ möglich. Die kühlere Luft kann durch geschickte Führung des Luftstroms auch zur Innenraumkühlung beitragen (Kaboré et al., 2018).

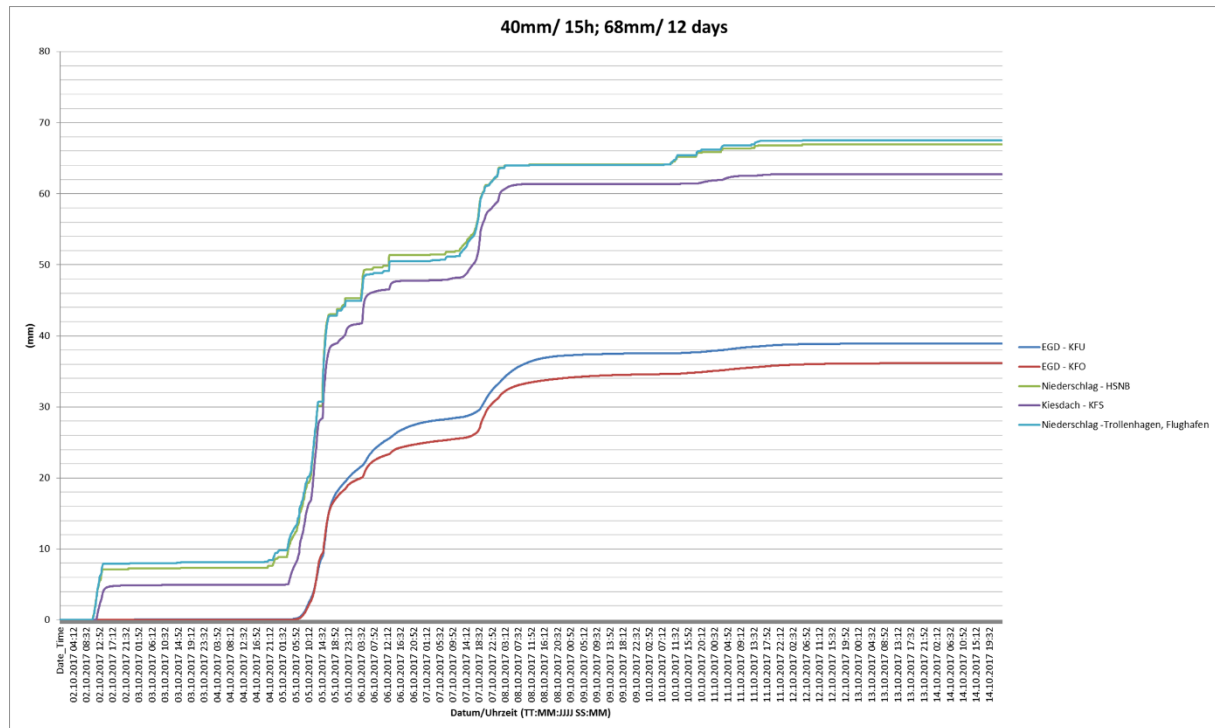
### 3.8 Dauerhaftigkeit

Die Begrünung der Außenhaut reduziert die Hitze- bzw. Kälteamplitude an der Dachhaut. Konventionell gebaute Flachdächer sind diesen Temperaturschwankungen besonders ausgesetzt. Das schwarze Bitumendach kann sommerliche Temperaturen von über 80°C erreichen (BUGG, 2019), in der Nacht senkt sich die Oberflächentemperatur des Bitumendaches und passt sich der Außenlufttemperatur an (z. B. 20 °C). Diese Schwankung von bis zu 60 K löst ein Zusammenziehen und Ausdehnen der Dachhaut aus, so dass Risse und Schadstellen entstehen können. Hagelschäden auf Gründächern sind bisher nicht bekannt. Die Bauwerksbegrünung reduziert deutlich die Temperaturamplitude, die Dachhaut „arbeitet“ nicht so stark. Die Dachhaut wird außerdem vor Alterung durch UV-Strahlung und Hagelschäden geschützt. Konventionelle Bitumendächer werden mit einer Lebenserwartung von 10 bis 30 Jahren geplant, Dächer mit Dachbegrünung mit 40 Jahren Lebenserwartung.



### 3.9 Regenwasserrückhalt und Abflussverzögerung durch extensive Gründächer

Extensive Gründächer (je nach Dimensionierung auf Gebäudeebene bzw. je nach Verteilung bzw. Vorkommen auf Quartierebene) haben einen Einfluss auf Niederschlagsrückhalt. EGRs entlasten durch den Niederschlagsrückhalt und den verzögerten Abfluss die Kanalisation. In Quartieren mit Mischkanalisation kann es zu einem geringeren Einleiten von Abwässern in Oberflächengewässern kommen. Zahlreiche Studien befassen sich mit der Thematik der Ablaufreduktion und der zeitverzögerten Abgabe von extensiven EGRs. Der gemessene Niederschlagsrückhalt liegt im Jahresmittel zwischen 50 und 70 %, bei intensiven Gründachaufbauten kann der Rückhalt bei nahezu 100 % liegen. Der verzögerte Abfluss und die Abflussreduktion sind beispielhaft in Abb. 5 dargestellt.



**Abb. 5:** Niederschlagsrückhalt und Ablaufverzögerung von 2 extensiven Gründach-aufbauten (blau und rot), einem Referenzkiesdach (lila) und dem aufsummierten Niederschlag (blau und grün) am Standort der Hochschule Neubrandenburg.

### 3.10 Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung

Die Regenwasserbewirtschaftung hat in den vergangenen zehn Jahren ein neues Stadium erreicht. In der Vergangenheit galt der Grundsatz, anfallendes Regenwasser auf Siedlungs- und Verkehrsflächen „so schnell und so vollständig wie möglich in die nächstliegenden Gewässer abzuleiten“ (Sieker et al., 2006: 11). Mittlerweile hat sich durchgesetzt, dass das anfallende Regenwasser auf abflusserzeugenden Flächen nachhaltig zu nutzen ist. Konkret bedeutet das, dass eine Ableitung des Oberflächenwassers dem des unbebauten Zustands annähernd entsprechen sollte. Dieser Nachhaltigkeitsgedanke soll auch auf die Komponenten Grundwasserneubildung und Verdunstung angewandt werden. Das bedeutet, dass der Zustand des annähernd natürlichen Wasserhaushalts im Gebiet erhalten, möglichst wenig verändert oder wiederhergestellt wird (vgl. Sieker et al., 2006: 11).

Die Regenwasserkanalisation wird so bemessen, dass sie das anfallende Wasser bis zu einem bestimmten Grenzwert ableiten kann. Es kann in seltenen Fällen auch vorkommen, dass die Kanalisation das anfallende Wasser nicht aufnehmen kann und es zu Überschwemmungen kommt. Mit statistischen Berechnungen wird die Häufigkeit solcher Ereignisse ermittelt. Dies ist notwendig, denn wenn die Kanalisation so ausgelegt wäre, dass sie auch der höchsten Belastung standhalten würde, wäre sie zum einen unbezahlbar und zum anderen



während dem Großteil der Zeit überdimensioniert und würden aufgrund zu geringer Wasserführung nicht richtig ableiten.

Heutzutage werden kaum noch neue Kanalisationen gebaut. Neuanlagen sind nur in sehr geringem Maße in Neubaugebieten erforderlich. Sanierungsarbeiten, bei denen die damit verbundenen Berechnungen und Überprüfungen von hydraulischer Leitfähigkeit und zulässigen Wiederkehrzeiten stellen ein viel größeres Vorhaben dar (vgl. Sieker et al., 2006: 15).

Der heutige Stand der Technik ermöglicht es, Regenabflüsse ortsnah ohne Vermischung mit Schmutzwasser so zu bewirtschaften, dass ein wesentlicher Teil dem Boden und somit dem Grundwasser zugeführt wird. Dies geschieht durch Speicherung, Versickerung, Verdunstung und gedrosselter Ableitung in Regenwassersystembauten (vgl. Sieker et al., 2006: 34).

In der Literatur wird eine große Bandbreite an Retentionswerten, in Abhängigkeit der Jahreszeit, Bepflanzung und Niederschlagsintensität mitgeteilt, die im schlechtesten Fall bei 10 % und in den besten Situationen bei nahezu 100 % liegt (z.B. Johannessen et al., 2018). Gründächer können in allen klimatischen Regionen der Welt Retentionsfunktionen erfüllen (Viola et al., 2017, Cipolla et al., 2016).

Die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung bietet mehrere technische Installationen und Maßnahmen, um die Ziele und Anforderungen zu erfüllen:

- Flächenversickerung;
- Muldenversickerung;
- Versickerungsbecken;
- Rückhalteanlagen wie z. B. Rückhaltebecken, Rückhaltegraben;
- Wechselfeuchte Mulde;
- Einstaudach;
- Dachbegrünungen;
- Unterirdische Versickerungsanlagen, wie z. B.:
  - Versickerungsschacht;
  - Versickerungsrigole;
  - Rohrversickerung;
  - Zisterne;
  - Rückhaltekanal;
  - Speicherschicht;
  - Diverse kombinierte Anlagen.

Diese Arbeit beschränkt sich auf die Ausführungen Einstaudach und Dachbegrünungen. Die Ausführung und Planung der anderen Installationen können jedoch in „Empfehlungen zur Versickerung und Wasserrückhaltung“ der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL) und in dem Buch „Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung im privaten gewerblichen und kommunalen Bereich“ von Sieker et al., 2006 nachgeschlagen werden. Eine weitere erwähnenswerte Quelle ist das „KURAS-Projekt“. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit von Fachpartnern aus Forschung und Planung sowie Berliner Entscheidungsträgern wurde eine modellhafte Demonstration integrierter Konzepte eines nachhaltigen Umgangs mit Schmutzwasser und Regenwasser urbaner Standorte erarbeitet.

### 3.11 Dachbegrünungen als Element der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung

Um den Nutzen von Gründächern in der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung zu verstehen, soll kurz der Aufbau der Vegetationsschicht eines Gründachs beschrieben werden.

Die Bauweise von extensiv und intensiv genutzten Dächern ist sehr ähnlich (siehe Abb. 6). Es gibt die einschichtige und die mehrschichtige Bauweise (vgl. Mann, 2012: 60).

Die Aufzählung der Schichten beginnt mit der Vegetation. Bei extensiven Begrünungen ist es wichtig, eine trockenheitsverträgliche und regenerationsfähige Pflanzenauswahl zu treffen. In Deutschlands

kühlgemäßigtem Klima ist es wichtig, dass die Pflanzen eine gewisse Unempfindlichkeit gegenüber Extremtemperaturen im Sommer wie im Winter haben, Windresistenz aufweisen und kurzzeitige Überflutungen bei Starkregenereignissen standhalten (vgl. Mann, 2012: 74).

Bei intensiven Dachbegrünungen steht der vielfältigen Pflanzenauswahl ähnlich der Pflanzenauswahl für einen normalen Garten nichts entgegen. Dennoch sollten - wenn möglich - weniger trocken, wind- und frostempfindliche Gewächse gewählt werden (vgl. Mann, 2012: 78).

Unter der Vegetation beginnt die Vegetationsschicht. Für diese Schicht werden meist technische Substrate verwendet, da örtlich vorkommende Oberböden den Anforderungen nicht entsprechen. Da das Substrat die Grundlage für die Vegetation bildet, muss dieses neben einer guten Durchwurzelbarkeit außerdem möglichst leicht sein, eine hohe Wasserspeicherkapazität und Wasserdurchlässigkeit haben, ausreichend Luftporenvolumen enthalten, sowie frei von unerwünschten Saaten und Wurzeln sein. Diese technischen Substrate enthalten meist Lava, Bims, Blähschiefer, Blähbeton, Ziegelsplitter, Rindenhumus und Grünschnittkompost (vgl. Mann, 2012: 64).

Die Filterschicht gehört zur Dränschicht und trennt diese vom Substrat (Vegetationsschicht). Das dünne Filtervlies besteht meist aus Polypropylen oder Polyester. Dieses Vlies muss wasserdurchlässig sein, jedoch verhindern, dass Substrat in die Dränschicht gelangt um die Wasserdurchlässigkeit und Speicherfähigkeit zu erhalten (vgl. Mann, 2012: 62f).

Tab. 6: Tabellarischer Vergleich von einschichtiger und mehrschichtiger Bauweise nach Mann 2012 aus Köhler (HRSG.) 2012: 60, erweitert durch Autoren.

Kriterien	einschichtige Bauweise	mehrschichtige Bauweise
<b>Begrünungsart</b>	Vorrangig extensiv, jedoch auch intensiv möglich	Extensiv und intensiv
<b>Einbauhöhe</b>	Meist 7 bis 10 cm	Ab ca. 10 cm
<b>Dränschicht</b>	Keine separate Dränschicht, Dränfunktion in Vegetationstragschicht integriert	Separate Dränschicht
<b>Filtervlies</b>	Nein	Meist mit Filtervlies
<b>Vegetationstragschicht</b>	Ja, mit Dränfunktionen. Deshalb mineralischer und grobkörniger als bei Mehrschichtbauweise.	Ja, separate Vegetationstragschicht mit organischen Anteilen.
<b>Nährstoffkapazität</b>	Aufgrund geringer organischer Substanz gering	Aufgrund der organischen Substanz hoch
<b>Wasserspeicherung</b>	Aufgrund der gleichzeitigen Dränfunktion geringer als bei mehrschichtiger Bauweise.	Hohe Wasserspeicherung in der Vegetationstragschicht
<b>Entwässerungsleistung</b>	Geringer als bei Mehrschichtbauweise	Aufgrund der separaten Dränschicht hoch
<b>Tröpfchenbewässerung</b>	Geeignet	Geeignet
<b>Anstaubewässerung</b>	Geeignet	Geeignet
<b>Einbau von Drosselementen</b>	Geeignet	Geeignet
<b>Einsatz bei stehendem Wasser</b>	Nicht geeignet	Gut geeignet, vor allem bei Dränelementen
<b>Mögliche Pflanzenvielfalt bei gleicher Aufbauhöhe</b>	Geringer als bei Mehrschichtbauweise	Hohe Artenvielfalt aufgrund der hohen Wasserspeicherfähigkeit.
<b>Vegetationstragschichten über 35 cm</b>	Gleicher Aufbau wie unter 35 cm.	Eine weitere mineralische Schicht ist notwendig.
<b>Kosten</b>	Meist günstiger als mehrschichtige Bauweise.	Bei gleicher Höhe aufwendiger als bei einschichtiger Bauweise.

Die darauf folgende Dränschicht kann aus Schüttgütern wie Lava, Blähschiefer oder Blähbeton, Recycling-Schüttstoffen wie Tonziegel, Industrieschlacke oder Schaumglas, Dränmatten wie Strukturvliesmatten, Kunststoff-Noppenmatten, Fadengeflechtmatten oder Schaumstoff-Flockenmatten, Dränplatten wie Kautschuk-Noppenplatten, Profilplatten aus Hartkunststoff oder Schaumkunststoff oder Drän- und Substratplatten aus modifiziertem Schaumstoff bestehen (vgl. FLL-Dachbegrünungsrichtlinien, 2008: 45). Die Dränschicht, die bei einer Extensivbegrünung eine Aufbauhöhe von ca. 1 bis 6 cm und bei einer Intensivbegrünung ca. 6 bis 15 cm hat, trägt die Hauptaufgabe Überschusswasser vom Dachaufbau Richtung Dachablauf und Entwässerungssystem abzuleiten. Eine Auswahl unterschiedlicher Materialien mit hoher Speicherkapazität von Niederschlagswasser für die Dränschicht kann die Fähigkeit Niederschlag für eventuelle Trockenperioden zwischen zu speichern steigern (siehe Tab. 6).

Um das Eindringen von Wurzeln und Wasser ins Gebäudeinnere zu verhindern, muss eine Dachabdichtung und wurzelfeste Schicht mit Schutzlage verlegt werden. Sie sollte von einem Dachdecker verlegt werden und muss an die Art der Dachbegrünung angepasst sein, die verbaut werden soll (vgl. Mann, 2012: 62). Das Abdichtungsmaterial besteht meist aus Bitumen-, Kunststoff- oder Elatomerbahnen, auch Flüssigabdichtung sind möglich und nach FLL-Richtlinien geprüft. Ist die gewählte Dachabdichtung noch nicht wurzelfest, so muss eine zusätzliche Wurzelschutzschicht aufgebracht werden („erfolgreich geprüft“, „Verfahren zur

Untersuchung der Wurzelfestigkeit von Bahnen und Beschichtungen für Dachbegrünungen“; FLL-Dachbegrünungsrichtlinien, 2018).

Vorteile von Dachbegrünungen in der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung bestehen besonders darin, dass das Substrat sowie die Drainage einen Teil des Niederschlagwassers zurückhalten. Je nach System und Aufbauhöhe können so Wasserrückhaltewerte von 30 bis 99 % des Jahresniederschlags erreicht werden. Dies trägt dazu bei, dass die Kanalisation entlastet wird (vgl. Mann, 2013: 76).

Auch die vergleichenden Untersuchungen in Peking (Gong et al., 2018) bestätigen die große Varianz in den Retentionswerten. So werden experimentell bei Starkregen mit 45 mm Niederschlag nur etwa 20 % zurückgehalten, während bei Niederschlägen von bis zu 20 mm etwa 80 % bei den hier eingesetzten Aufbaustärken zurückgehalten wurden. Trotz der großen Varianz in den Werten, wird in chinesischen Städten bereits vielfach die Gründachtechnologie als eine typische Methode („Schwammstadt“) umgesetzt.

Piro et al. (2018) untersuchte das Retentionsverhalten von Gründächern im Mediterranklima (Kalabrien) und erbrachte den Nachweis der Retentionswirkung und Verschiebung des maximalen Abflussscheitels bei Starkregen. Eine ähnliche Arbeit aus Valencia (Spanien), Andrés-Doménech et al. (2018) befasst sich mit der Retentionswirkung und potentieller Verdunstungsleistungen der Gründächer zwischen winterlichen 1 mm/d und sommerlichen 4-6 mm/d, je nach Wasserangebot.

### **3.12 Gründächer in der Wasserwirtschaft**

Um Gründächer als wasserwirtschaftliches Werkzeug einordnen zu können, muss zuerst die Einordnung in die Systematik der Wasserwirtschaft (Abb. 6) mit ihren diversen und vielfältigen Teilbereichen erfolgen. In diesem Bericht werden nur die Teilbereiche kurz erklärt und definiert, die wichtig sind, um die Position von Gründächern, die Hauptbestandteile dieses Berichts sind, innerhalb des weiten Feldes der Wasserwirtschaft richtig zu verstehen.

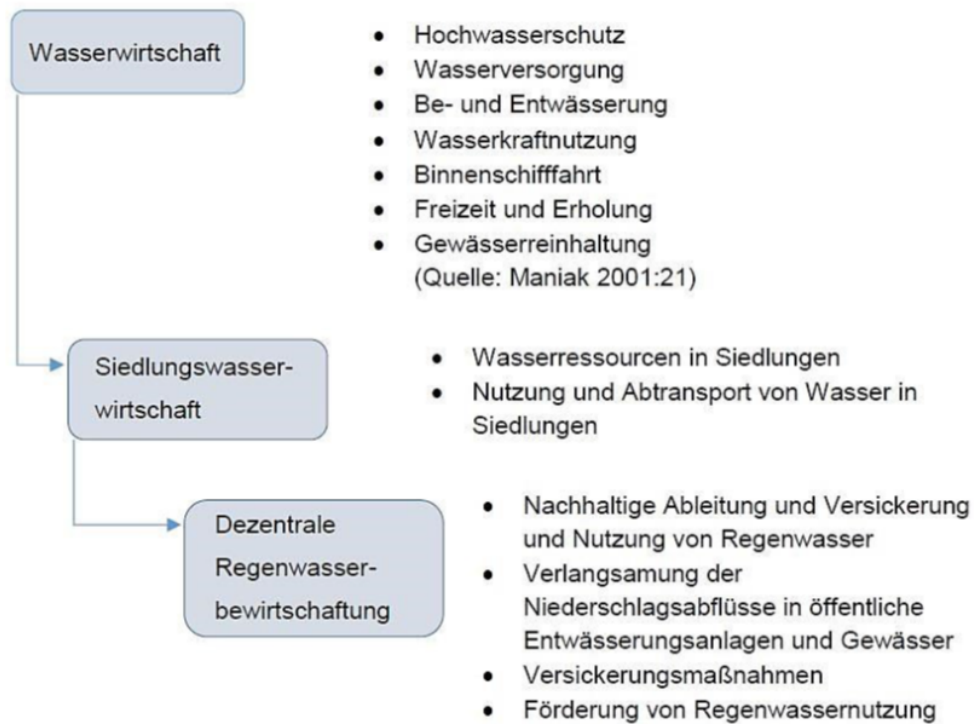


Abb. 6: Einordnung der Dezentralen Regenwasserwirtschaft in die Systematik der Wasserwirtschaft nach Maniak, 2001:21 bearbeitet durch Wolff.

### 3.13 Wasserwirtschaft

Die „Wasserwirtschaft wird als zielbewusste Ordnung aller menschlichen Eingriffe auf das ober- und unterirdische Wasser bezüglich Menge, Güte und Ökologie definiert.“ (Maniak, 2001: 1). Diese Definition zeigt, dass der Begriff Wasserwirtschaft als Oberbegriff zu verstehen ist.

Wasserwirtschaftliche Projekte haben hohe Zielsetzungen, die sich durch ihren interdisziplinären Charakter auf die gesamte Bevölkerung und viele Bereiche der Ökologie auswirken (vgl. Maniak, 2001: 31). Das gesellschaftliche obergeordnete Ziel, welches die Wasserwirtschaft mit einem so großen Wirkungsbereich anstrebt, ist besonders die Verbesserung der Lebensqualität. Diese Verbesserung lässt sich nach Maniak (2001: 32) in vier Punkte aufteilen, die einen besonderen Nutzen daraus hervorbringen:

- Verbesserung der gesamtwirtschaftlichen Effizienz durch direkten Zuwachs an Gütern und Leistungen wie einen direkten Output und Produktivitätssteigerung. Ein Sicherheitsgefühl durch Hochwasserschutz in Siedlungen und der Infrastruktur ist ein gutes Beispiel dafür;
- Erhaltung und Verbesserung der Umweltqualität durch Pflege und Schutz. Die Schaffung und Erhaltung von Landschaftsteilen natürlicher Schönheit und Attraktivität, besonders wertvoller oder hervorragender kultur- und naturhistorischer Denkmäler, ökologischer Systeme, Landschaftsvielfalt sowie die Erhaltung und /oder Verbesserung bei Wasser-, Boden-, Luftqualität empfinden die meisten Menschen als Verbesserung der Lebensqualität;
- Die Förderung der Regionalentwicklung (Teilräume), bedingt durch die verbesserte Lebensqualität, schafft regionale Beschäftigung mit regionalem Einkommen und begünstigt so die dazugehörige regionale Bevölkerungsentwicklung;
- Diese Verbesserung des sozialen Wohlbefindens leitet zum Abbau von Disparitäten in der Einkommensverteilung, dem Schutz des Lebens und der Gesundheit durch soziale Sicherheit, dem Ausbau der Möglichkeiten für Bildung, Kulturgenuss und Erholung in der Region sowie einer allgemeinen Verbesserung der Wohnqualität hin.

### 3.14 Siedlungswasserwirtschaft

„Die Siedlungswasserwirtschaft befasst sich mit dem Umsatz von Wasser im Umfeld von Siedlungen. Dabei interessiert nicht nur das Wasser an sich, sondern genauso die darin enthaltenen Stoffe und Organismen und die Prozesse, die auf diese Stoffe einwirken.“

Als Wirtschaftszweig stellt die Siedlungswasserwirtschaft strukturelle, organisatorische und technische Infrastruktur bereit. Diese sind erforderlich, um das Wasser in den Siedlungen zu bewirtschaften und zu entsorgen; das heißt für den Menschen gefahrlos zu nutzen, ohne langfristig die Grundlage dieser Nutzung zu gefährden.“ (Gujer, 2002: 1).

Die Siedlungswasserwirtschaft hat eine große wirtschaftliche Bedeutung, die die heutige Gesellschaft maßgeblich beeinflusst und formt. Die Verantwortung, langfristig für genügend Trinkwasser in hygienisch einwandfreier Qualität zur Verfügung zu stellen, liegt in der Hand der Siedlungswasserwirtschaft. Die Aufbereitung anfallender Abwässer und deren Wiedereinleitung in die Umwelt gehört zum Aufgabenbereich (vgl. Gujer, 2002: 17).

Wie auch schon bei der Wasserwirtschaft ist die Siedlungswasserwirtschaft in sehr viele Unterthemen aufgeteilt, die sich wiederum sehr breit fächern lassen.

An dieser Stelle wird die Siedlungshydrologie besonders hervorgehoben. Im späteren praktischen Teil dieser Arbeit spielt diese eine tragende Rolle.



### 3.15 Das Einstaudach als Element der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung

Das Retentionsdach ist eine Kombination aus einem konventionalen Gründach mit zusätzlichem Einstau und passiver Bewässerung durch Kapillaraufstieg. Dieser Dachaufbau wurde u. a. in den Versuchsreihen der wiegenden Kleinlysimer verwendet (Kapitel: 5). Diese Form der Begrünung ist noch nicht weit verbreitet, zusätzliche Kosten und eine höhere Lastaufnahme entstehen. Gelegentlich wird dieser Begrünungstyp bei Tiefgaragen verwendet, um weiteren nötigen Stauraum auf dem Grundstück zu schaffen.

Das Niederschlagswasser sickert durch die Vegetations- und Substratschicht und wird dann in eine Retentionsvorrichtung geleitet, die aus extrem profiliertem Kunststoff besteht. Diese speichert das Wasser und gibt es mit einer hohen Zeitverzögerung an die Kanalisation ab. Außerdem gibt es noch die Möglichkeit, einen dauerhaften Anstau von Wasser auf dem Dach anzulegen. Auch bei dieser Ausführung können die profilierten Kunststoffplatten verwendet werden.

Um einen Wasserspeicher auf dem Dach zu erstellen, muss lediglich der Ablauf, der das Wasser eigentlich ableitet, um die gewünschte Höhe erhöht werden. Bei einer Erhöhung des Ablaufs von beispielsweise 4 cm können zusätzlich 40 Liter Wasser pro Quadratmeter auf dem Dach gespeichert werden. Dies verringert die Ablaufrate der Dächer signifikant. Außerdem steht der Vegetation das gespeicherte Wasser zur Verfügung (alle Systemanbieter von Gründächern bieten eine Systemlösung mit einem Kapillarsystem an, welches das Wasser wieder zu der Substratschicht zurückführt und somit den Pflanzen zur Verfügung stellt). Das den Pflanzen zur Verfügung gestellte Wasser wird auf natürlichem Wege verdunstet und kühlt somit die Umgebung. Die diversen Systemanbieter für Gründächer bieten unterschiedliche Lösungen, um einen solchen Anstau zu erzeugen. Die Wasser-Anstauhöhen reichen von 1 cm bis 15 cm (soweit die Statik dies erlaubt). Mittlerweile gibt es Dachflächen, die gar keinen Ablauf mehr erzeugen.

Bei beiden Anlagen zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung ist nicht zu vergessen, dass bei gesplitteten Abwassergebühren die Kosten zur Entsorgung von Niederschlagswasser, welches in €/m<sup>2</sup> Dachfläche berechnet wird, gesenkt werden kann. Begrünte Dachflächen, die wie oben beschrieben, einen Großteil des Niederschlagswassers speichern, werden üblicher Weise mit einer Gebührenreduktion von 50 % belohnt (vgl. Ansel, 2012: 21).

## 4 Messungen: Wiegende Kleinlysimeter (HSNB)

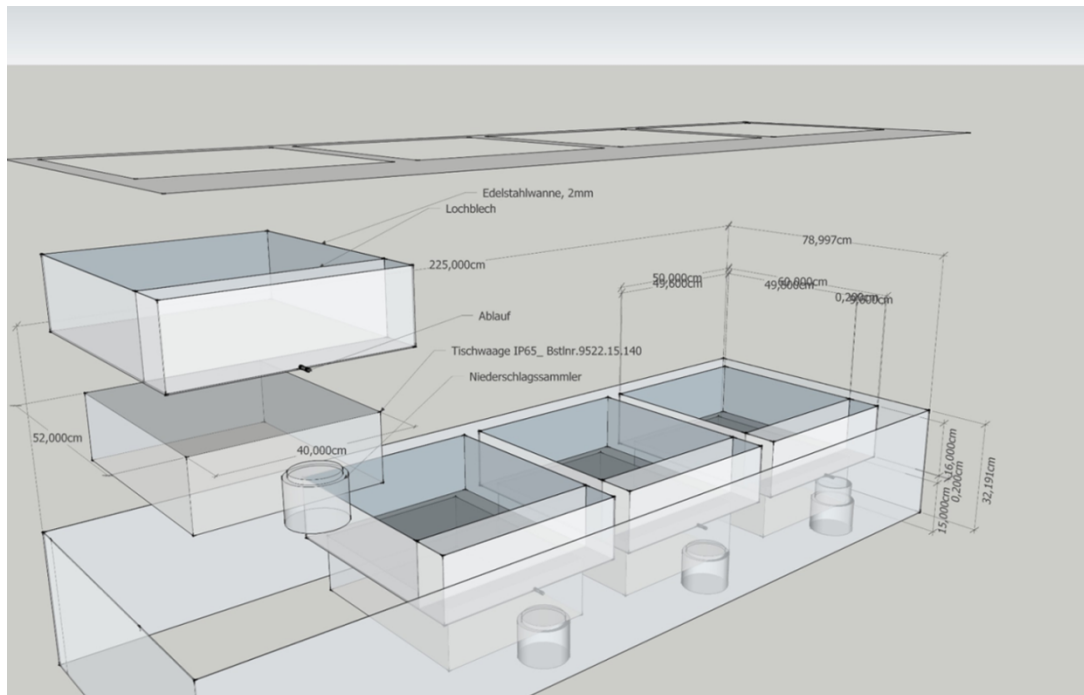
Wiegende Kleinlysimeter werden in der Umweltforschung eingesetzt, sie ermöglichen quantitative und qualitative Aussagen zum Ablaufverhalten und der ET. In dem Forschungsvorhaben wurde auf Ablaufkippen verzichtet, da die reinen Verdunstungstage (kein Niederschlag und kein Ablauf über 24 Stunden/Tag) im Fokus standen. Die Erweiterung der Anlage fand im Frühjahr 2017 statt. Für gewöhnlich benötigen die Systeme bis zu einem Jahr um Messfehler, wie durch fehlende Vegetation und/oder fehlende Bodenanschlüsse zu minimieren. Ein Teil der Lysimeter befindet sich auf dem Niveau der Dachbegrünung, die Vegetation der Versuchsfelder liegt auf Höhe der Umgebungsvegetation. Die neuen Lysimeter sind aufgrund der erhöhten Bauweisen auf der bestehenden Vegetation aufgebaut, zur thermischen Abschottung wurde eine komplette Abdeckung um die Kleinlysimeter gebaut.

An der Hochschule Neubrandenburg wurden wiegende Lysimeter entwickelt, mit denen die Verdunstungsleistung von begrünten Dächern über in das Dach eingebaute Waagen gemessen werden können. Im Rahmen des KURAS-Regenwasserprojektes wurde die wasserwirtschaftliche Bedeutung typischer Extensivdächer untersucht und mittels Rechenverfahren auf Stadtteile hochgerechnet. Das KURAS-Projekt wurde Mitte 2016 beendet. Dieses Forschungsvorhaben wurde auf die entwickelte Methode aufgebaut, um die Effekte einer Zusatzbewässerung und die Erhöhung des Substratsaufbaus mittels Lysimetern zu bemessen und für Gebäude hinsichtlich des Kühlpotentials hochzurechnen.

Städtische Wärmeinsel entstehen durch die Aufheizung von Baumassen und zeitverzögerte Abgabe der gespeicherten Wärme in den Nachtstunden. Begrünte Dächer können diesem entgegenwirken. Allerdings ist bei extensiven Gründächern gerade im Sommer die aktive Verdunstungskühle eingeschränkt, da die Substrate überwiegend lufttrocken sind.

Die Entwicklung und Kalkulation einer intelligenten Bewässerungssteuerung ist notwendig und soll im vorliegenden Forschungsprojekt mittels verschiedener Szenarien erprobt werden. Berücksichtigt werden Zisternengröße, Jahresniederschlag und Bewässerungssteuerung in einer Vielzahl von Varianten.

## 4.1 Funktionsweise von wiegenden Kleinlysometern



**Abb. 7: Aufbau der wiegenden Kleinlysimeter.**

Wiegende Kleinlysimeter (siehe Abb. 7) arbeiten mit der Aufzeichnung der Gewichtszu- bzw. -abnahme. Der Ablauf wird in der Regel über eine Kippwaage geleitet. Aus der Bilanzierung kann ein Niederschlagsrückhalt und die Verdunstungsleistung errechnet werden. Die verbauten Feinwaagen haben eine Genauigkeit von 2 g, bei einer max. Kapazität von 60 kg. In diesem Forschungsvorhaben wurden die wiegenden Kleinlysimeter ohne die Kippwaagen betrieben, Ziel dieser Messung war die tägliche Verdunstungsleistung über 24 Stunden, ohne Ablauf.

## 4.2 Monitoringsysteme

Der ursprünglich hohe Kosteneinsatz zur Erhebung von relevanten klimatischen Messungen für Dachbegrünungen konnte durch den Einsatz von dezentralen Einchipcomputern und einer Software auf Open Source Basis (Abb. 8 und 9, weiterentwickelt im Rahmen des Kuras-Projektes) erheblich gesenkt werden. Der Einsatz von wiegenden Kleinlysometern zur Messung der Evapotranspiration von extensiver Dachbegrünung ist ein innovativer Forschungsansatz der Hochschule Neubrandenburg.



Abb. 8: Dezentrale Messstation, mit eingebauter USV.

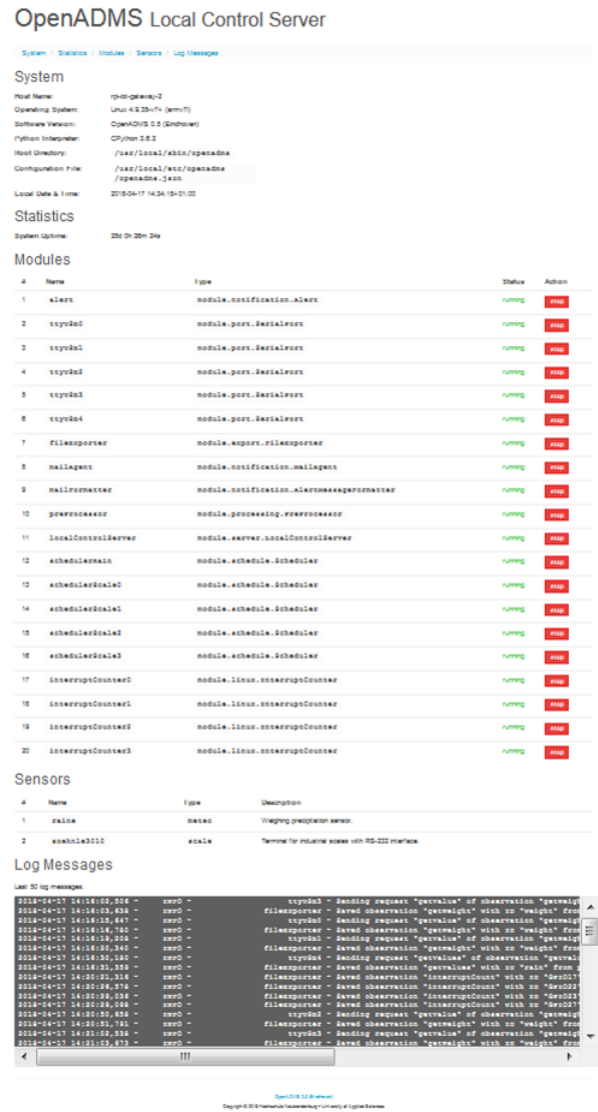


Abb. 9: Cloudbasiertes Monitoringsystem.

### 4.3 Aufbau der Messstation

Die Hochschule Neubrandenburg wurde im Jahr 1991 gegründet und bildet das wissenschaftliche Zentrum der Region. Heute besuchen die Campushochschule 2100 Studierende in Bachelor- und Masterstudiengängen in sozial- und erziehungswissenschaftlichen, gesundheits- und pflegewissenschaftlichen Fachrichtungen sowie in den Bereichen Agrarwirtschaft, Lebensmitteltechnologie, Geoinformatik, Geodäsie und Messtechnik sowie Landschaftsarchitektur und Naturschutz und Landnutzungsplanung.

Dieser Teil der Studie wurde auf den experimentellen Gründächern der Hochschule Neubrandenburg durchgeführt (53,56 N, 13,27 E). Die Stadt hat ca. 65.000 Einwohner und liegt in Nordostdeutschland. Die Stadt liegt im nordöstlichen Tiefland und hat ein kontinentales und maritimes Klima. Der jährliche Durchschnittsniederschlag beträgt 558 mm bei einer Durchschnittstemperatur von 8,5 °C. Im Sommer liegt die höchste Durchschnittstemperatur im Juli bei 17,5 °C und die niedrigste Temperatur wird im Mittel im Januar erreicht und liegt bei 0,7 °C. Die Vegetationsperiode dauert ca. 247 Tage.

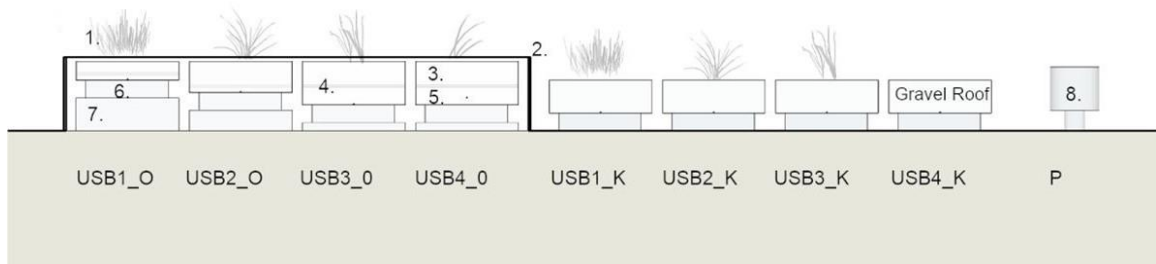
Die Experimente begannen in den 1980er-Jahren mit der Bilanzierung des Wasserhaushaltes von einschichtigen Gründachaufbauten. In den 1990er-Jahren ermöglichte die Entwicklung des ersten Lysimeter für flache Dachschichten die Quantifizierung der ETa in Echtzeit. Die Lysimeter waren mit einem 10 cm Substrataufbau versehen und konnten komplett in das bestehende Gründach integriert werden (siehe Abb. 10).



**Abb. 10:** Integration der wiegenden Lysimeter in ein bestehendes Gründach, Hochschule Neubrandenburg (Haus 3).

Die Lysimeter haben eine Messfeldgröße von 0,25 m<sup>2</sup>, eine maximale Gewichtsbelastung von 60 kg und eine Genauigkeit von 1 g.

In der Versuchsreihe wurden 8 Kleinlysimeter verwendet. Die Auswahl der Waagen variiert daher, die max. Gewichtsaufnahme geht bis 120 kg. Auch die Versuchsflächen variieren zwischen 0,25 und 0,5 m<sup>2</sup>. In diesem Forschungsprojekt wurde das Kleinlysimeter ohne Kippwaage betrieben. Ziel dieser Messungen war es, die tägliche Verdunstung über 24 h ohne Ablauf zu messen (Abb. 11).



**Abb. 6:** Die wiegende Lysimeterstation befand sich auf einem Gründach der Hochschule Neubrandenburg. Der Rahmen wurde verwendet, um die Auswirkungen von Wind und Strahlung auf die Versuchsflächen zu minimieren. Legende: (1) Vegetation, (2) Rahmen, (3) Substrat.

Diese Aufstellung befand sich auf dem Dach (ca. 15 m hoch, Haus 2) der Fachhochschule in Neubrandenburg, Deutschland.

In diesem Aufbau wurden verschiedene Arten von EGRs getestet. Die Lysimeter wurden auf 0 ° Gefälle eingestellt (Abb. 12,13). Die Abmessungen für USB1\_O, USB2\_O, USB3\_O und USB4\_O betragen 0,5 m<sup>2</sup> und 0,25 m<sup>2</sup> für USB1\_K, USB2\_K, USB3\_K und USB4\_K (Tab. 7 und 8). Für die Berechnung und Vergleichbarkeit wurden die Abmessungen für alle Lysimeter auf 1 m<sup>2</sup> skaliert. USB1-4\_K wurde 2014 mit einer Tiefe von 16 cm aufgebaut. USB1-4\_K wurde im Jahr 2016 erbaut. Der Niederschlag wurde mit einem Ombrometer mit 0,01 mm Genauigkeit gemessen. Die Aufbauten besitzen unterschiedliche Aufbauhöhen, teils mit einer passiven



indirekten Bewässerung durch zusätzliche Retentionskörper. Die Höhe der Waagen wurde angepasst, um eine gleichmäßige Höhe der Oberfläche zu gewährleisten.



**Abb. 12: Einbau des Filtervlieses.**



**Abb. 13: Höhenausrichtung der Wägezellen, damit wird eine einheitliche Vegetationshöhe gewährleistet.**



## 4.4 Verwendete Schichtaufbauten

Tab. 7: Aufbau der wiegenden Kleinlysimeter, Schichthöhe, Gewicht wassergesättigt, neue Station.

USB 4 (mit 3,5 cm Anstau)			USB 3			USB 2			USB 1		
Aufbau	Höhe [cm]	Gewicht wasserges. [kg]	Aufbau	Höhe [cm]	Gewicht wasserges. [kg]	Aufbau	Höhe [cm]	Gewicht wasserges. [kg]	Aufbau	Höhe [cm]	Gewicht wasserges. [kg]
RMS300	0,28	0,58	RMS300	0,28	0,58	RMS300	0,28	0,58	RMS300	0,28	0,58
WRB85i	8,50	10,15	WRB85i	8,50	0,38	FKD25	2,50	1,28	FKD25	2,50	1,28
Filtervlies Typ 105	0,10	0,00	Filtervlies Typ 105	0,10	0,00	Filtervlies Typ 105	0,10	0,00	Filtervlies Typ 105	0,10	0,00
Ext.-Substrat E-leicht	12,00	43,20	Ext.-Substrat E-leicht	12,00	43,20	Ext.-Substrat E-leicht	12,00	43,20	Ext.-Substrat E-leicht	6,00	21,60
Sedum-Gras-Kraut		2,50	Sedum-Gras-Kraut		2,50	Sedum-Gras-Kraut		2,50	Sedum-Gras-Kraut		2,50
<b>Gesamt</b>	<b>20,88</b>	<b>56,43</b>		<b>20,88</b>	<b>46,65</b>		<b>14,88</b>	<b>47,55</b>		<b>8,88</b>	<b>24,95</b>

Tab. 8: Aufbau der wiegenden Kleinlysimeter, Schichthöhe, Gewicht wassergesättigt,

USB 1-3 (kuras)			USB 4 (kuras)		
Aufbau	Höhe [cm]	Gewicht wassergesättigt [kg]	Aufbau	Höhe [cm]	Gewicht wassergesättigt [kg]
RMS300			Kies (16 – 32)	10	80
WRB85i					
Filtervlies Typ 105	0,10	0,00			
Ext.-Substrat E-leicht	16,00	57,6			
Sedum-Gras-Kraut		2,50			
Gesamt	16,10	60,10	Kies	10	80

## 4.5 Methodik

Die Felder mit einer Grundfläche von 0,25 m<sup>2</sup> und 0,5 m<sup>2</sup> werden auf 1 m<sup>2</sup> hochgerechnet, um eine einfachere Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Durch Messung der mittleren Gewichtsänderung in 2 g-Schritten in einem Intervall von 5 Minuten ist es bei einer Langzeitüberwachung möglich, die Menge der Evapotranspiration des Wassers während des Tages und die Kondensation von Wasser in den Morgenstunden zu quantifizieren. Folgende Bezeichnungen (Abb. 14 – 17) in den Diagrammen sind den sonstigen Bezeichnungen im Bericht zugewiesen (Tab. 9).

Tab. 9: Zuordnung der Versuchsfelder

Bezeichnung	
Gravel roof 16 cm	USB4_K
Green roof 16 cm, Soil A	USB1_K
Green roof 16 cm, Soil B	USB2_K
Green roof 16 cm, Soil C	USB3_K

### Schritt 1: Zusammenstellen der Rohdaten

Die Datensätze der einzelnen Waagen werden zusammengeführt und grafisch dargestellt. Die Messreihen werden dabei monatsweise ausgewertet (Abb. 14)

### Schritt 2: Bereinigung

In diesem zweiten Schritt (Abb. 15) werden die kompletten Tage mit einem Niederschlagsereignis und einem Ablauf aus dem Datensatz entfernt (grau hinterlegt). Ein Tagesgang ist an der gleichmäßigen Gewichtsabnahme über den Tag und einer Stagnation in den Nachtstunden zu erkennen.

### Schritt 3: Überlagerung

Die bereinigten Daten werden überlagert. Es gibt nur noch einen Tagesgang (24 h) für jeden Monat. In dieser Darstellung lassen sich noch weitere Tagesgänge mit Niederschlag und Ablauf finden, diese werden hier komplett für alle Waagen entnommen. In diesem Schritt wird der Startpunkt, des bereinigten Datensatzes, für jeden Tag auf 0:00 Uhr gesetzt. Eine morgendliche Gewichtszunahme (Kondensation) ist zu erkennen und eine starke Gewichtsabnahme in den Tagesstunden (Abb. 16).

### Schritt 4: Erstellung von gemittelten Monatswerten

Die täglichen Verdunstungswerte werden auf 1 m<sup>2</sup> hochgerechnet und gemittelt. Zu erkennen ist hier eine deutlich niedrigere Verdunstungskurve bei dem Referenzkiesdach (Abb.17).

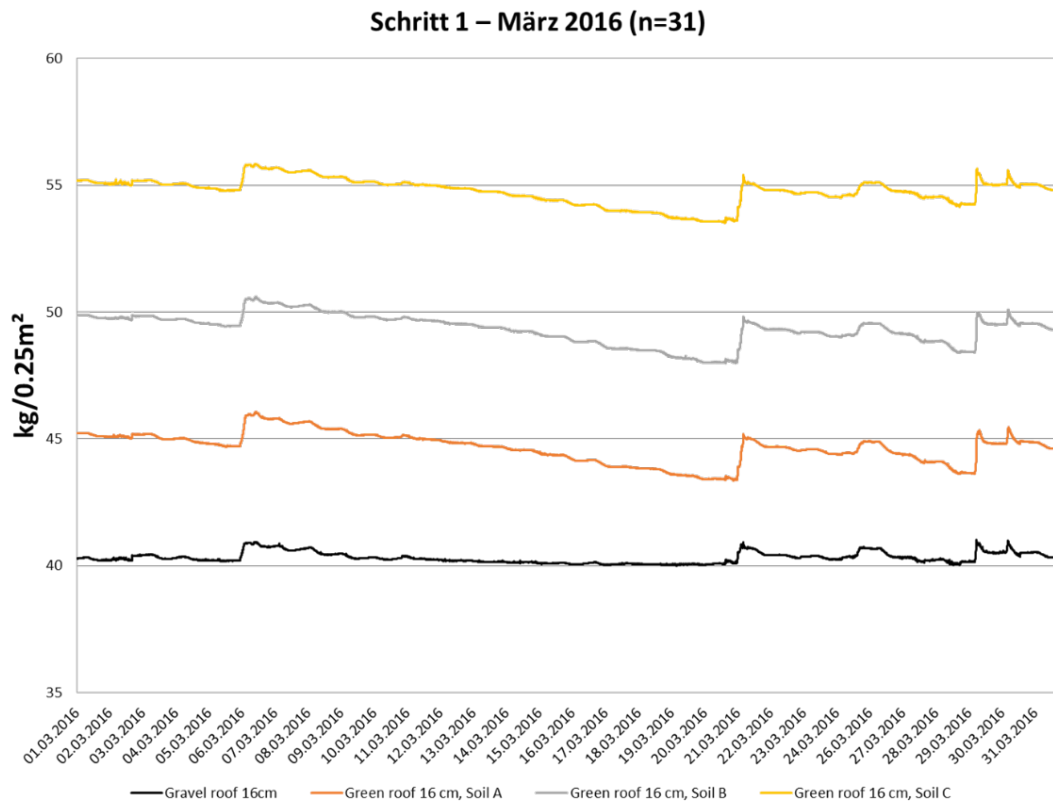


Abb. 14: Schritt 1: Verarbeitung der Rohdaten (n= 31 Tage).

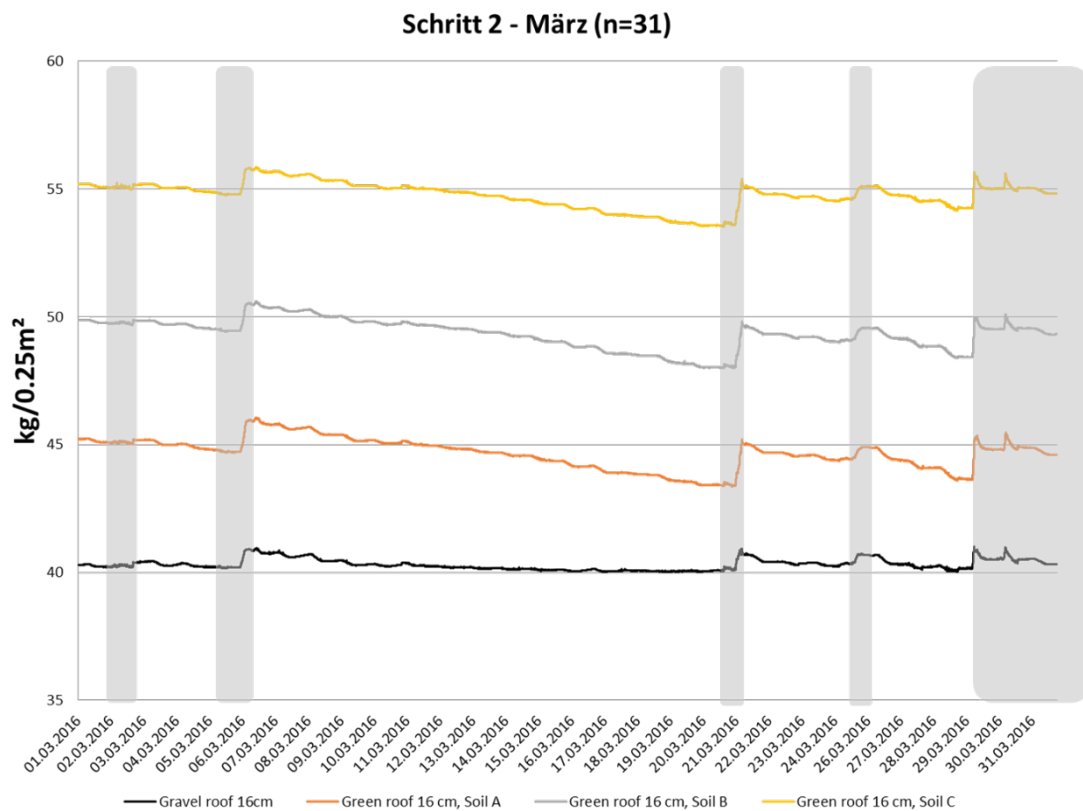


Abb. 15: Schritt 2: Entfernung von Tagen mit Niederschlägen und Abläufen. (n= 31 Tage (Tage ohne Niederschlag und Ablauf)).

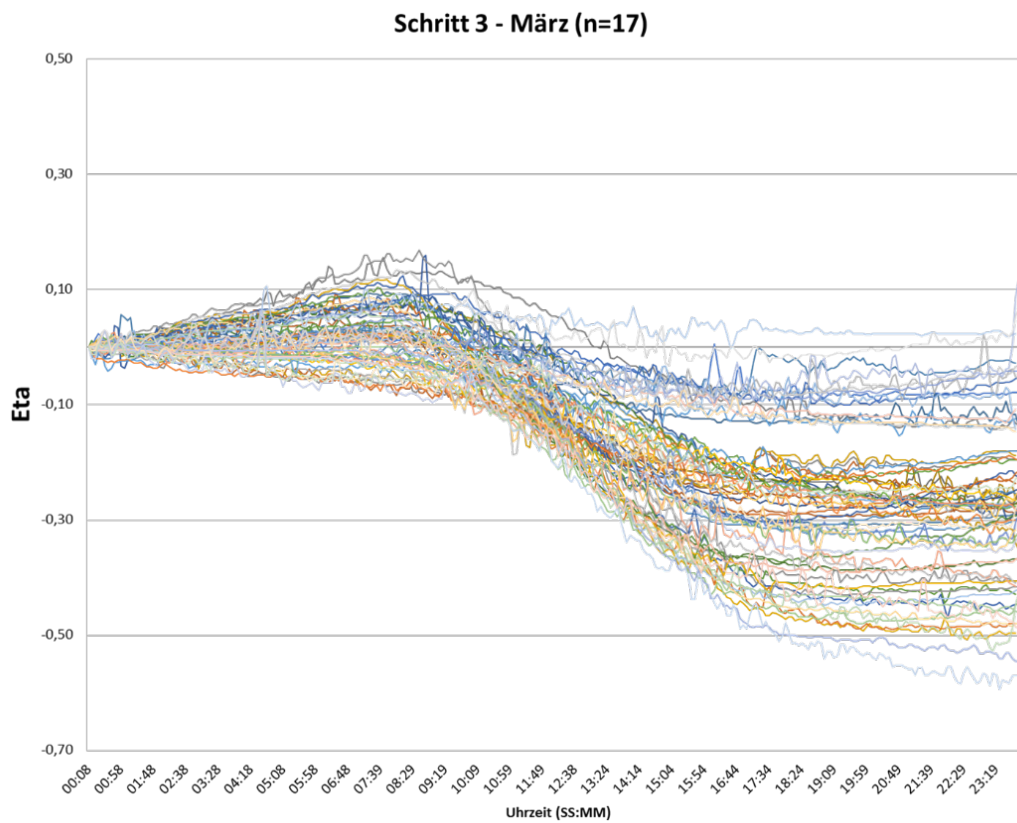


Abb. 16: Schritt 3: Darstellung der einzelnen Tagesgänge (Reduzierung der Tagesgänge auf n= 17 Tage (Tage ohne Niederschlag und Ablauf)).

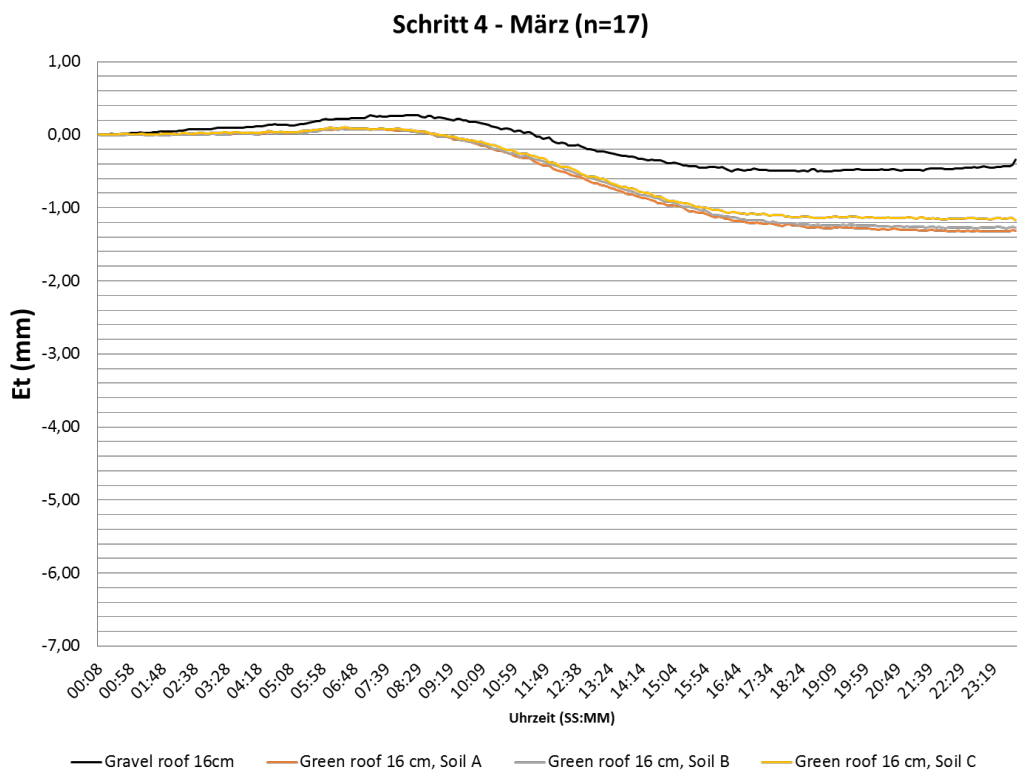


Abb. 17: Mitteln aller Tagesgänge zu einem mittleren Tagesgang pro Monat.

### 4.6 Mittlere tägliche Verdunstungswerte

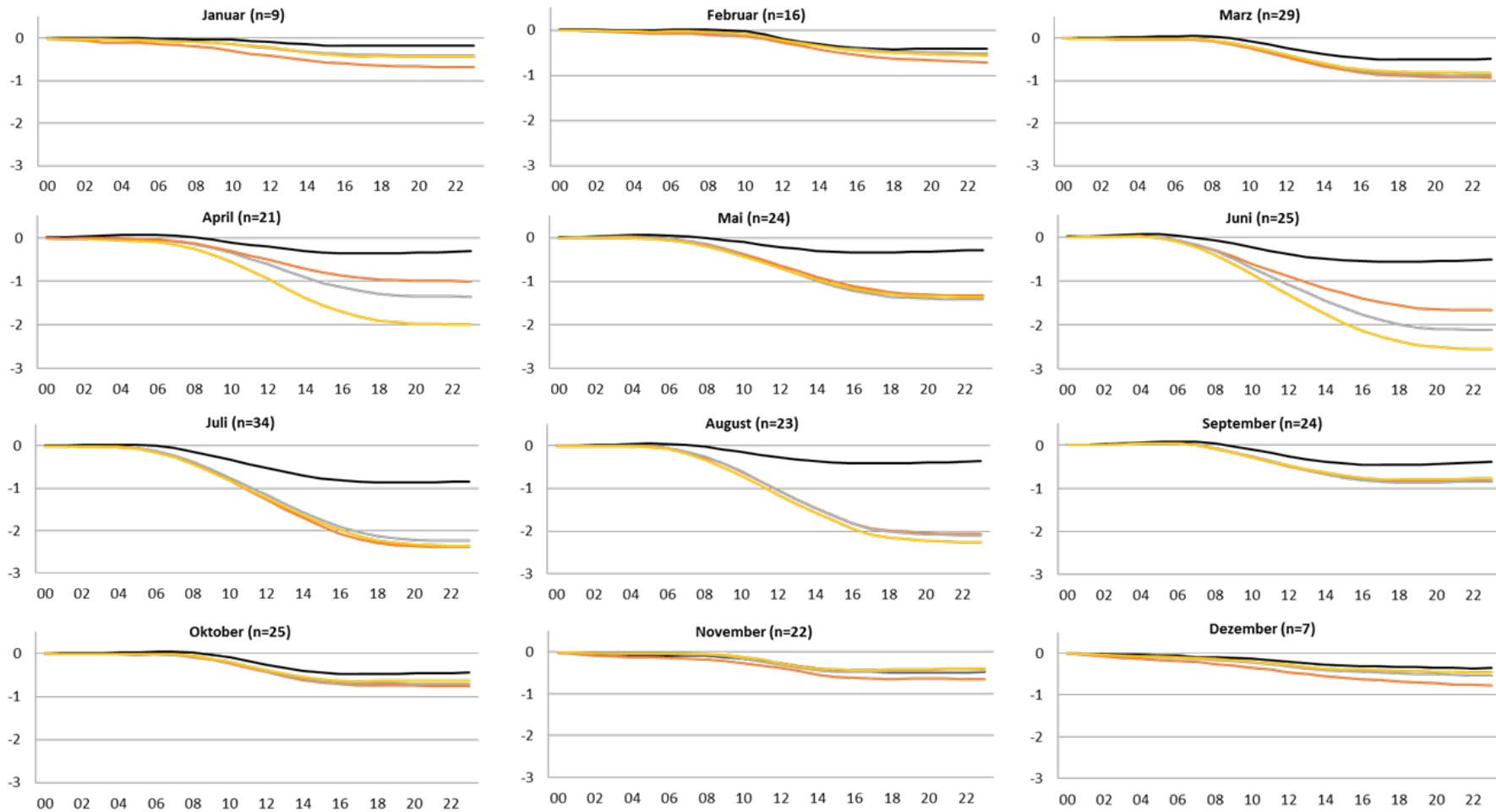


Abb. 18: Mittlere tägliche Verdunstungsleistung von extensiven Gründächern, Y-Achse: durchschnittliche tägliche  $ET_a$  (mm); X-Achse: Uhrzeit (SS).

Für zukünftige Simulationsmodelle, zur Ermittlung der potentiellen Verdunstungsleistung sind mittlere tägliche Verdunstungswerte sinnvoll. Für diese Auswertung (siehe Abb. 18) fanden Daten aus den Jahren 2015 und 2016 Verwendung. Vergleicht man diese Daten mit den Daten aus 2018 mit einer zusätzlichen Bewässerung, so wäre die tägliche potentielle Verdunstungsleistung bedeutend höher.

In den Wintermonaten ist eine Anpassung der täglichen ET an das Niveau des Referenzkiesdaches zu erkennen. Die in der Literatur oft erwähnte durchschnittliche Verdunstungsleistung von 3 mm/Tag wurde im Mittel nicht erreicht, auch wenn der Substrataufbau auf 16 cm erhöht wurde. An einzelnen Tagen wurde eine ET von bis zu 4,3 mm/Tag erreicht.

#### 4.7 Mittlere jährliche Verdunstungsleistung

Aus der Abb. 19 geht hervor, die ETa hat ihren Höhepunkt in den Monaten Juni, Juli und August. In diesen drei Monaten (92 Tage) liegt die ETa zwischen 187 und 219 mm.

Mit einem Anstieg von Temperatur, Sonnenscheindauer und Niederschlag, ist ein signifikanter Anstieg der potentiellen Verdunstungsleistung nachgewiesen. Die Verdunstungsleistung in der Vegetationsperiode liegt teilweise über dem Niederschlag. Nicht berücksichtigt wurde in dieser Aufstellung die Kondensation an der Oberfläche.

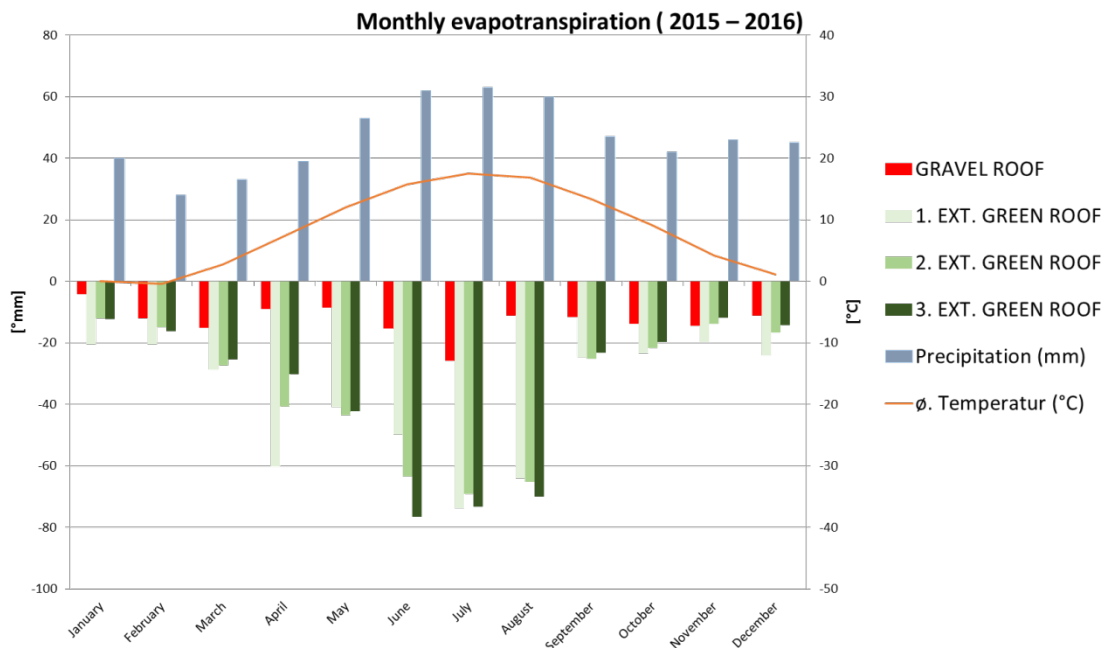


Abb. 19: Monatliche Verdunstungsleistung pro  $m^2$ , Zusammenfassung aller Werte zweier Messjahre.



## 5 Ablaufmessung

Auf den Dachflächen von Haus 2 und 3 befinden sich die Versuchsdachflächen zur Abflussmessung (Abb. 20).

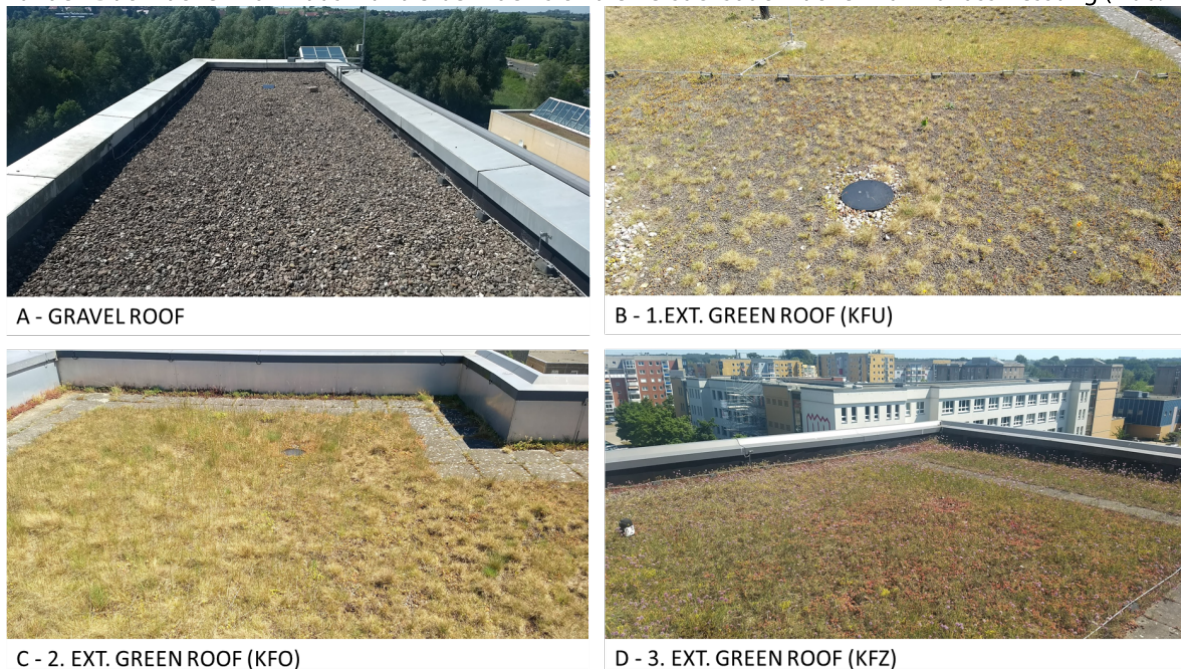


Abb. 20: Übersicht zu den 4 Versuchsdachflächen (Die Großvolumenkippen befinden sich unterhalb der Abläufe.) auf Haus 2 und 3 der Hochschule Neubrandenburg. Die Größe der Versuchsfelder variierte von 103,5 m<sup>2</sup> (Kiesdach) bis 206,16 m<sup>2</sup> (extensives Gründach) (Tab. 10).

Tab. 10: Tabellarische Übersicht der Versuchsfelder.

Name der Versuchsfeldfläche	Kies (A-Gravel roof)	D- KFZ	C- KFO	B- KFU
Gebaut	1999	1999	2001	2001
Versuchsfeldfläche in m <sup>2</sup>	103,79	112	206,16	150,62
Dränschicht	keine	Noppenmatte	Schüttdränage	Schüttdränage
Substrattiefe in cm	16	10	10	10
Typ des Substrats	<b>Kies</b>	Ziegelbruch-Substrat	Systemsubstrat <b>Optigrün</b>	Systemsubstrat <b>Ulopor</b>
Vegetation	keine	gut	gut	wenig

### 5.1 Haus 2

Das Gebäude Haus 2 wurde 1999 gebaut. Im Rahmen des Neubaus wurden auf dem Dach des Hauses ein Gründach und Messstationen geplant.

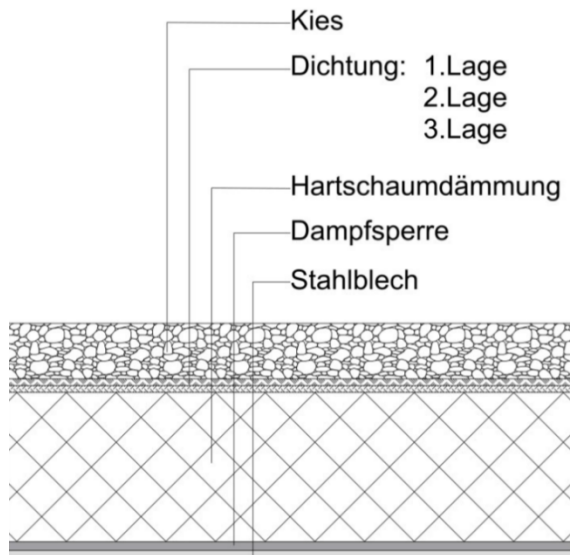
So befinden sich heute neben dem extensiven Gründach Messstationen der Geoinformaten und einer Wetterstation mit Windmessung in zwei Höhen (1 m und 8 m Höhe), Messinstrumente zum Erfassen von Globalstrahlung und Strahlungsbilanz, Thermometer zur Messung von Boden- und Lufttemperatur, mehrere Niederschlagssammler und ein Infrarotoberflächenthermometer auf dem Dach. Außerdem werden der

Bodenwärmestrom, Verdunstungsleistung überwiegende Lysimeter sowie die Ablaufleistung der Dächer mit Hilfe von Großvolumenkippen gemessen.

### Das Kiesdach auf Haus 2 (Kies)

Neben dem Gründach und den diversen Messgeräten befindet sich außerdem ein gesamter Haustechnik-Trakt auf dem Dach. Hier sind unter anderem die Lüftung, die Technik des Aufzuges und die Klimaanlage untergebracht. Dieser Technik-Aufbau ist mit einem Kiesdach (Abb. 21) ausgestattet. Dieses Kiesdachen ist auch das Referenz-Dach für alle Niederschlagsmessungen.

Das Kiesdach hat folgenden Aufbau:



**Abb. 21:** Schematischer Aufbau der Referenzfläche Kies auf Haus 2, Bildquelle: Schnitt des Dachaufbaus vom Bauplan, bearbeitet von Autoren.

Wie auf der oben gezeigten Abb. 21 gut zu sehen ist, besteht das Dach des Technik-Aufbaus aus einer Unterkonstruktion, einem Stahlblech gefolgt von der Dampfsperre. Die Dampfsperre verhindert jede Diffusion von innen nach außen, um eine Durchfeuchtung von Bauteilen zu verhindern. Als Werkstoffe eignen sich entsprechende Spezialpapiere, Aluminiumfolien oder Kunststofffolien. Werden Dampfbremsen darüber hinaus falsch geplant und ausgeführt, sind Schimmelbildungen die Folge (vgl. Baunetz 2018).

Als nächste Schicht kommt die Hartschaumdämmung gefolgt von den drei Dachdichtungslagen. Die Dachabdichtungslagen wie in Abb. 21 zu sehen, sind Bitumenschweißbahnen in verschiedenen Stärken, die die Dachhaut schützen und abdichten. Diese Konstruktion wird dann mit Kies aufgefüllt.

Kies beschwert die Dachhaut und schützt vor äußeren Umwelteinflüssen. Das Niederschlagswasser, welches auf die Kiesschicht fällt, wird schnell abgeleitet. Kiesdächer werden heutzutage kaum noch gebaut. Häufig werden Bitumendächer errichtet, die teilweise mit Solarpaneelen bestückt zur Energiegewinnung genutzt werden. Um die Solarpaneele zu beschweren, wird zumeist Kies verwendet. Zur Befestigung der Solarpaneele können neben Kies auch Unterkonstruktionen fest mit dem Baukörper verbunden werden, dies hat aber eine Durchdringung der Dachhaut zur Folge.

Die Lastannahme von einem Kiesdach ist ähnlich der eines extensiven Gründachs, so dass sich ein reines Kiesdach heute nicht mehr bewehrt.

Laut FLL-Dachbegrünungsrichtlinien (2018: 113) hat 1 cm Kies eine Last von 16-18 kg/m<sup>2</sup> und eine Wasserspeicherkapazität von 0,6-0,9 l/m<sup>2</sup>. Im Gegensatz dazu hat Recycling-Ziegelsplitt, welcher auf dem Gründach von Haus 2 verwendet wird, bei 1 cm Schichtdicke eine Last von 13-15 kg/m<sup>2</sup> und eine Wasserspeicherkapazität von 2,3 l/m<sup>2</sup>. Die meisten Substrate, die auf Gründächern verwendet werden,

bestehen aus Bims (bei 1 cm 8-12 kg/m<sup>2</sup>, 2,7-3,8 l/m<sup>2</sup>), Blähton (bei 1 cm 5-8 kg/m<sup>2</sup>, 1-2,5 l/m<sup>2</sup>) und Lava (bei 1 cm 10-14 kg/m<sup>2</sup>, 1,5-2,6l/m<sup>2</sup>).

Der Kies, der auf dem Dach der Hochschule verwendet wurde, ist ein bunter Kies, 50 mm, mit einer Aufschüttungshöhe von 16 cm. Die Gesamtversuchsfläche des Kiesdachs beträgt 103,79 m<sup>2</sup> (Abb. 22).

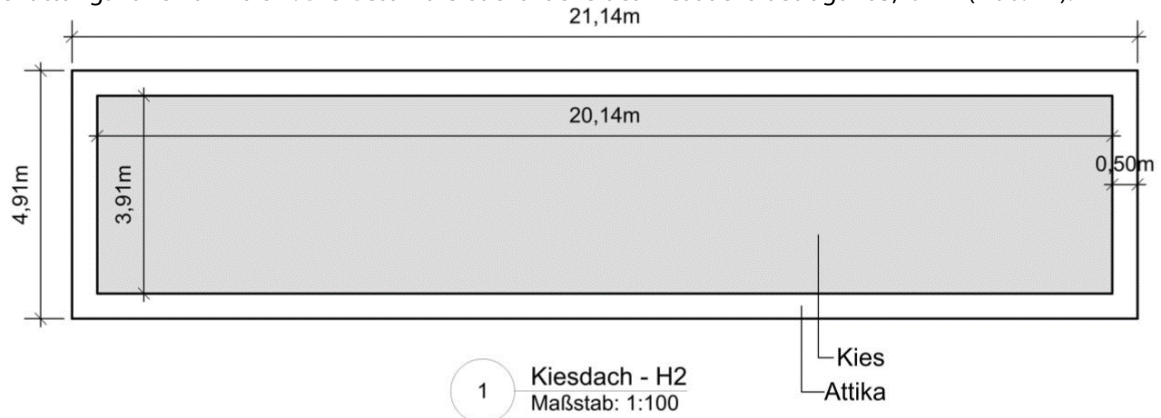


Abb. 22: Aufsicht der Referenzfläche Kies auf Haus 2.

### Das Gründach auf Haus 2 (KFZ)

Das extensive Gründach auf Haus 2 bedeckt ca. drei Viertel der Gesamtdachfläche. Die Versuchsfläche, die in dieser Arbeit behandelt wird, hat eine Gesamtfläche von 112 m<sup>2</sup> (Abb. 23). Der Gründachaufbau ist extensiv und hat folgenden Aufbau:

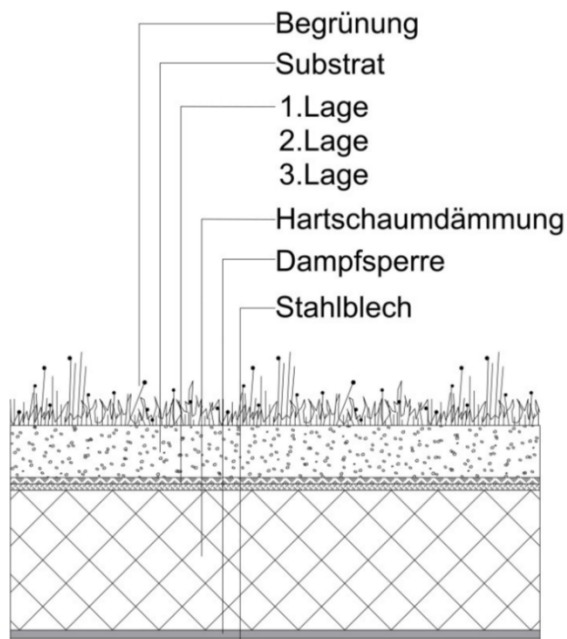


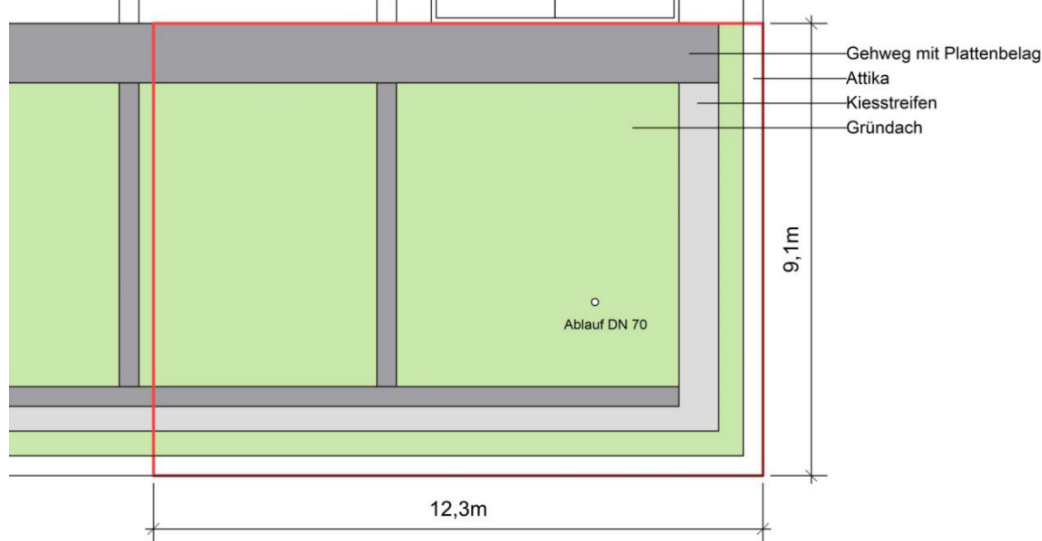
Abb. 23: Schematischer Aufbau des Gründachs auf Haus 2, Bildquelle: Schnitt des Dachaufbaus vom Bauplan, bearbeitet von Wolff.

Die Besonderheit dieses Gründachs ist, dass hier anstatt einem System-Substrat die Recycling-Alternative verbaut wurde. Die 10 cm Substrat-Schüttung besteht zu 90 % aus Ziegelbruch. Ziegelbruch kann bei einem Einschichtextensiv-Dach eine Alternative zu den herkömmlichen Substratmischungen bieten. Die Dränschicht des Dachs ist eine umfunktionierte Noppenbahn, die im Hochbau normalerweise als Schutzschicht, Feuchtigkeitisolierung und Wärmedämmung dient.

Bepflanzt wurde das Dach mit einer Trockenansaat. Diese enthielt hauptsächlich diverse Sedum-Arten. Da das Dach schon mehr als 19 Jahre existiert, haben sich nach und nach immer mehr Arten angesiedelt. So gibt es mittlerweile verschiedene Arten von Gräsern, diverse Kräuter und sogar Flechten. Hauptsächlich herrschen die Arten Sedum spec. (Mauerpfeffer), Festuca ovina (Echte Schaf-Schwengel) und seit ca. 10 Jahren durch Selbstaussaat Allium schoenoprasum (Schnittlauch).

Wie auf der Abb. 24 zu sehen ist, hat die Versuchsdachfläche einen DN 70 Ablauf.

Die Attika nimmt eine Fläche von 8,1 m<sup>2</sup> in Anspruch. Der gepflasterte Weg hat eine Oberfläche von 23,7 m<sup>2</sup>. Der Kiesstreifen hat eine Oberfläche von 9,6 m<sup>2</sup> und die Begrünung nimmt eine Fläche von 70,7 m<sup>2</sup> ein.



**Abb. 24:** Gezeichnete Aufsicht Haus 2 mit der Versuchsfläche KFZ.

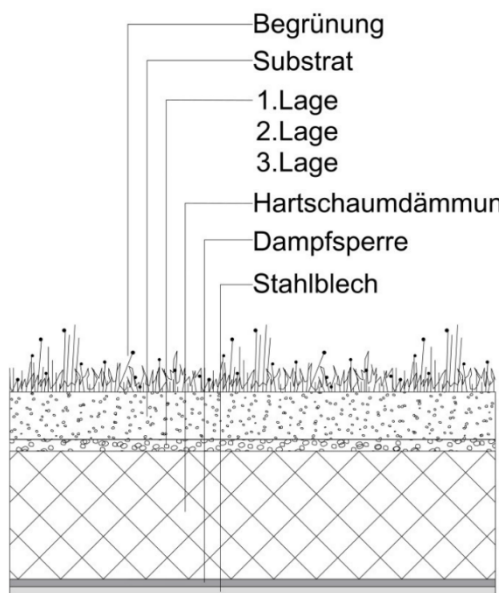
Diese Angaben sind wichtig, denn sie bestimmen wie schnell oder langsam das Wasser vom Dach in den Ablauf geleitet wird. Der Ablauf auf der Versuchsfläche ist an eine Großvolumenkippe angeschlossen, um das ablaufende Wasser bei Regenereignissen zu messen.

## 5.2 Haus 3

Das Gebäude Haus 3 wurde 2001 gebaut. Im Rahmen des Neubaus wurde auf dem Dach des Hauses ein Gründach angelegt, das direkt mit in die Forschung einbezogen wurde.

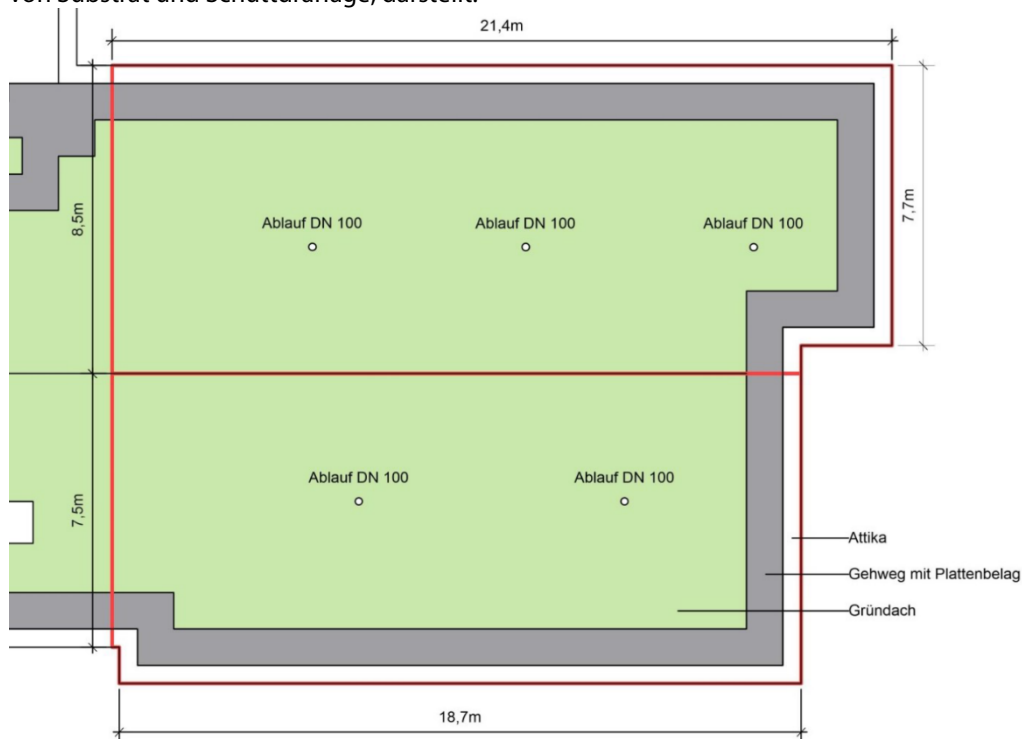
So ist das Dach in viele verschiedene Versuchsflächen unterteilt, die alle mit verschiedenen Substraten und Ansaaten ausgestattet sind.

Der technische Aufbau der Dachfläche unterscheidet sich nur geringfügig von Haus 2. Die Noppenmatte, die auf Haus 2 verwendet wurde, entfällt hier. Der Dachaufbau besteht aus Schüttgut und benötigt nicht zwingend eine Dränagematte. Das Substrat dient hier nicht nur dem Wasserrückhalt, sondern auch der Dränagewirkung (Abb. 25).



**Abb. 25:** Schematischer Aufbau des Gründachs auf Haus 3, Bildquelle: Schnitt des Dachaufbaus vom Bauplan, bearbeitet von Wolff.

Das bedeutet, dass gemäß Abb. 26 Lage 3 das Schutzvlies auf der Dachabdichtung, Lage 2 die Schüttdränage (in diesem Fall mit einer 3 cm Aufschüttung) und Lage 1 das Filtervlies, zur Vermeidung einer Vermischung von Substrat und Schüttdränage, darstellt.



**Abb. 26:** Aufsicht Haus 3 mit den Versuchsflächen KFO und KFU.

Die Substrate auf Haus 3 sind pro Versuchsfläche verschieden und werden dann bei der jeweiligen Vorstellung beschrieben.



Auf dem östlichen Teil des Gebäudes befinden sich die Versuchsflächen KFO und KFU (Abb. 26), die in dieser Arbeit behandelt werden. Wie auf der Abb. 26 zu sehen ist, teilt sich die Grünfläche in der Mitte. Diese Aufteilung ist gleichzeitig der Hochpunkt des Gefälles von 2 % in Richtung der Abläufe.

Die Teilfläche KFO, die sich nördlich Richtung Haus 2 befindet, hat einen extensiven Aufbau und eine Gesamtversuchsfläche von 206,16 m<sup>2</sup>. Das Substrat dieser Dachfläche ist von der Firma Optima (heute Optigrün). Die Substratmischung wird „Extensiv-Schwer“ beschrieben. Das bedeutet, dass das Substrat schwerer ist als die „leichte“ Variante. Das schwere Substrat beinhaltet eine höhere Anzahl an schweren Bestandteilen als Lava, ganz im Gegensatz zu den leichten Substraten, welchen zur Gewichtsreduktion häufig Blähschiefer oder Blähton untergemischt werden (vgl. Optigrün, 2017: 86). Die Begrünung erfolgte durch Trockenansaat mit einem Sedum-Gemisch. Wie auch auf dem Dach auf Haus 2 haben sich durch das langjährige Bestehen des Daches weitere Pflanzen angesiedelt. So herrschen nun *Poa compressa* (Flaches Rispengras), *Festuca ovina* (Schaf-Schwingel), *Sedum sexangulare* (Milder Mauerpfeffer) und *Petrorhagia saxifraga* (Steinbrech-Felsennelke) vor. Die Teilfläche KFO hat drei DN 100 Abläufe, die das ablaufende Wasser in eine Messstation, die unterhalb des Dachs im Gebäude integriert ist, leitet.

Die zweite Teilfläche KFU, die südlich in Richtung der Kleingartenanlage ausgerichtet ist, hat ebenfalls einen 10 cm Extensivaufbau und eine Gesamtversuchsfläche von 150,62 m<sup>2</sup>. Das Substrat Blähschiefer in der Körnung 8-16 mm der Firma Ulopor ist auf diesem Dach in einer 10 cm dicken Schicht ausgebracht worden. Auch hier erfolgte eine Sedum-Trockenansaat. Auf dieser Teilfläche herrscht heute *Sedum sexangulare* (Milder Mauerpfeffer), *Festuca ovina* (Schaf-Schwingel), *Petrorhagia saxifraga* (Steinbrech-Felsennelke) und vereinzelt *Hieracium aurantiacum* (Orangerote Habichtskraut) vor. Diese Teilfläche hat, wie in Abb. 24 zu erkennen ist, zwei DN 100 Abläufe. Diese Abläufe leiten das anfallende Regenwasser genau wie die andere Teilfläche auf Haus 3 zu einer im Haus integrierten Messstation.

### 5.3 Aufbau der Großvolumenkippen

Die Großvolumenkippen sind eine eigene Konstruktion und wurden extra für die Messaufbauten in Haus 2 und 3 angefertigt. Das Funktionsprinzip der Großvolumenkippe wird in Abb. 27 dargestellt. Sie befinden sich eine Geschossebene unterhalb der Gründachaufbauten und sind fest in der Haustechnik integriert.

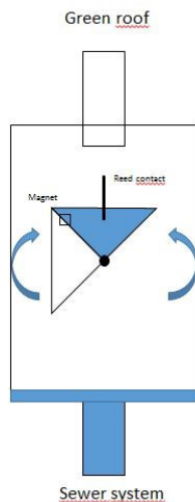


Abb. 27: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Großvolumenkippe.

Das ablaufende Regenwasser wird in die Kippschaufel geleitet. Die Kippschaufel hat ein Volumen von 1 Liter. Wenn die Schaufel voll (oder annähernd voll) ist, kippt diese und löst einen Sensor aus, der aufwärts zählt. Danach fließt die zweite Schaufel voll und löst wieder den Zählmechanismus aus. Auf diese Weise kann ermittelt werden, wie viel Liter während eines Niederschlagsereignisses vom Dach ablaufen.

## 5.4 Kalibrierung der Großvolumenkippen

Je nach Kippintensität und Durchflussmenge kann ein aufgezeichneter Impuls ein unterschiedliches Volumen bedeuten. Eine Kalibrierung (Abb. 28) mit definiertem Volumen in unterschiedlichen Intensitäten ist nötig, um die tatsächliche Durchflussmessung zu bemessen.

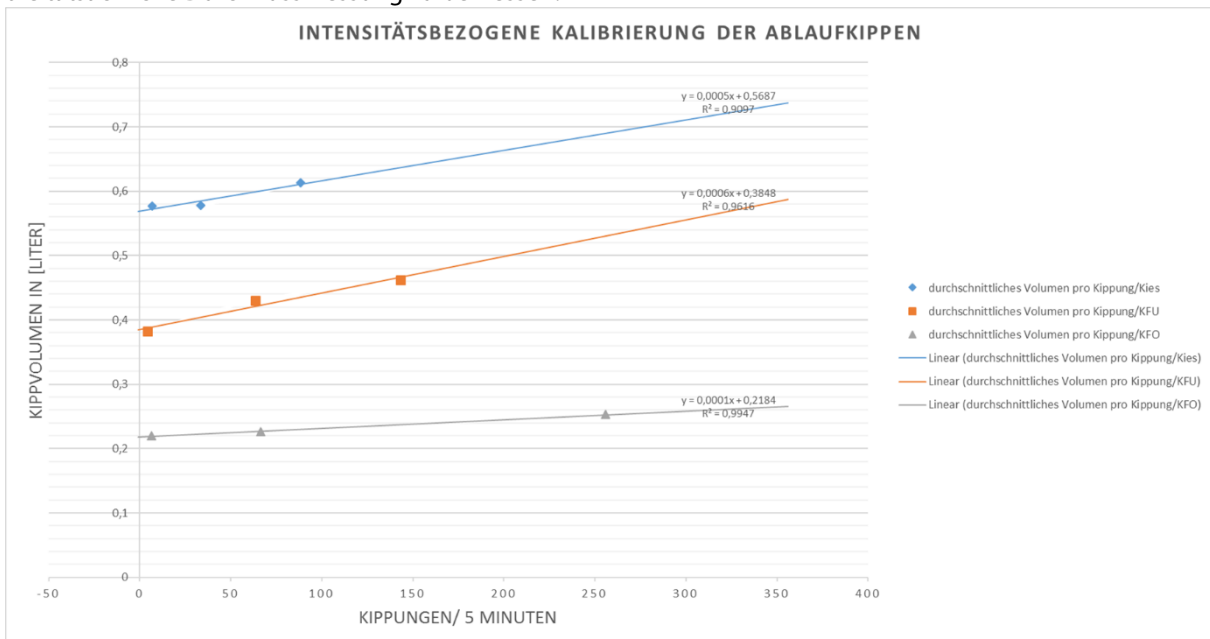


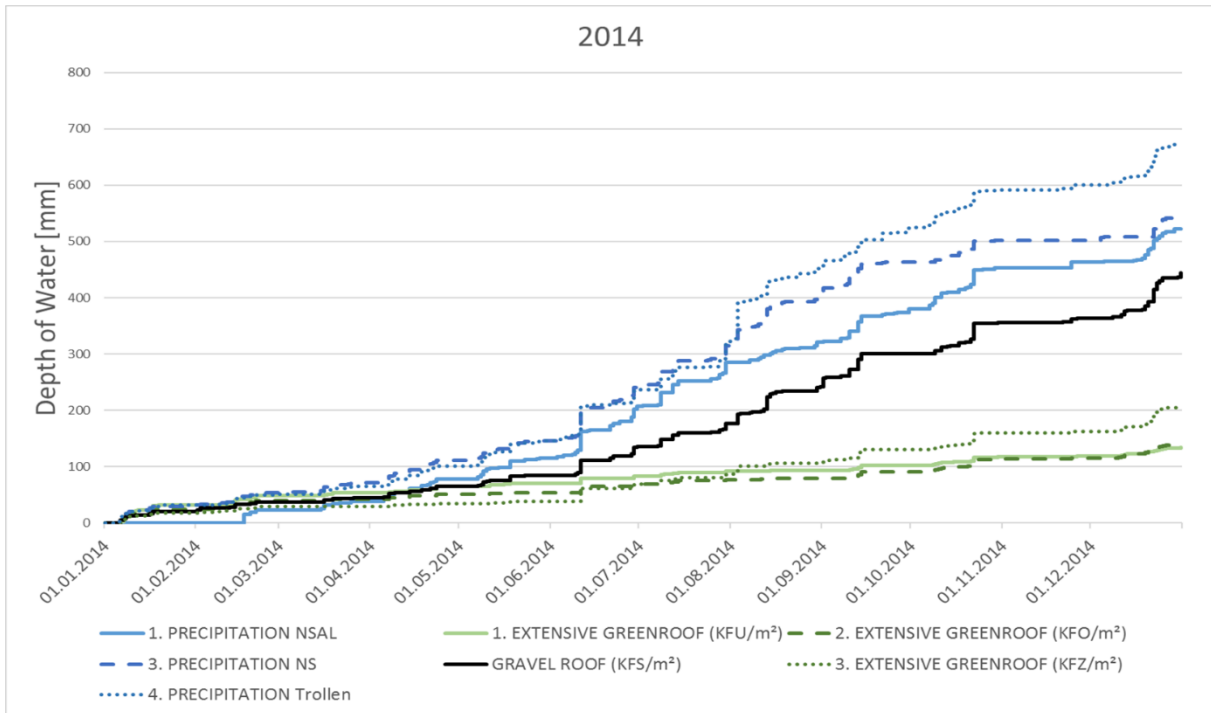
Abb. 28: Kalibrierung der Großvolumenkippen.

## 5.5 Jährliches Ablaufverhalten von extensiven Gründächern

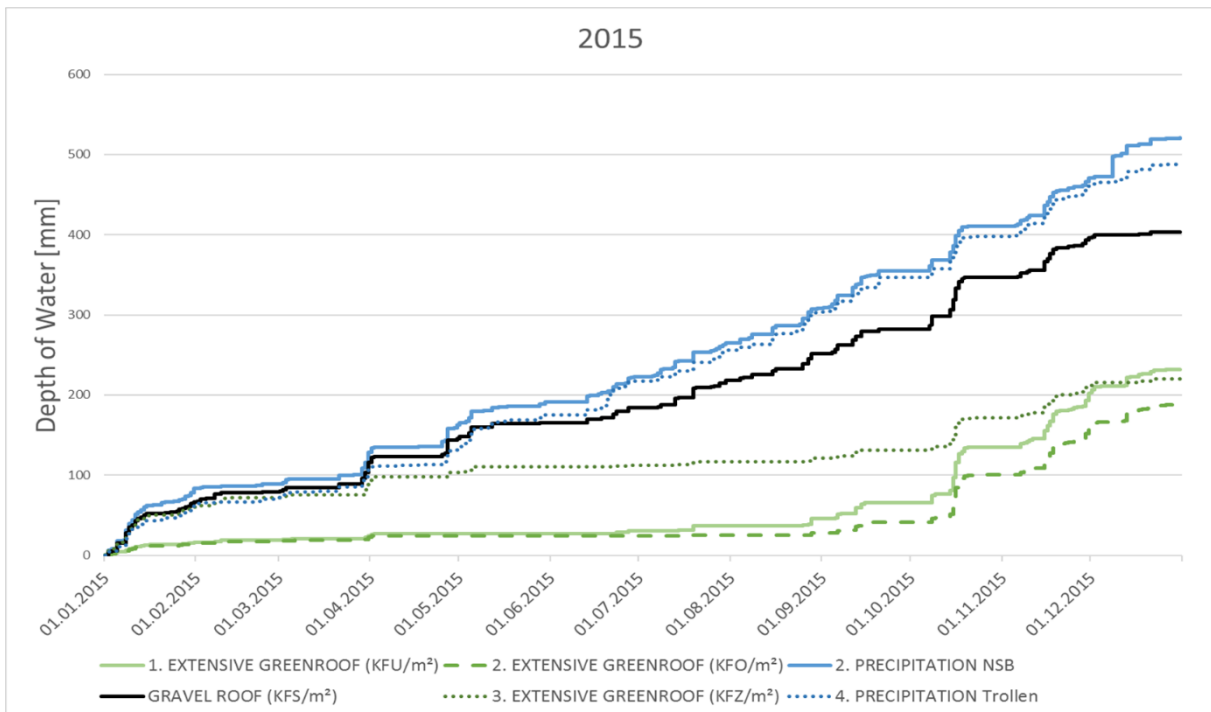
Kontinuierliche Niederschlags- und Ablaufmessungen wurde 47 Monate lang durchgeführt und ausgewertet (Abb. 29 - 32). Startpunkt dieser Messreihe war der 1. Januar 2014 und das Ende der Messreihe der 11. November 2017. Die Datenanalyse ist in Tab. 11 dargestellt.

Der durchschnittliche Niederschlag für diese Kampagne betrug 545,23 mm. Die Jahre 2015 und 2016 waren trockener, mit einem reduzierten Niederschlag von ca. 50 mm. Die Ablaufintensitäten der Versuchsdächer wurden kalibriert. Die Messungen für das KFZ wurden im Januar 2016 abgebrochen (Ausfall der Messtechnik), daher wurden nur Daten von 2014 und 2015 für diese Analyse verwendet. Der Abflusskoeffizient für die extensiven Gründächer (EGDs) lag zwischen 0,29 und 0,4 (Tab. 2).





**Abb. 29.** 2014, Jahresniederschlag und Rückhalt von ext. Gründachaufbauten und einem Referenzkiesdach, gemessen und kalibriert an Großvolumenkippen (aufsummiert).



**Abb. 30:** 2015, Jahresniederschlag und Rückhalt von ext. Gründachaufbauten und einem Referenzkiesdach, gemessen und kalibriert an Großvolumenkippen (aufsummiert).

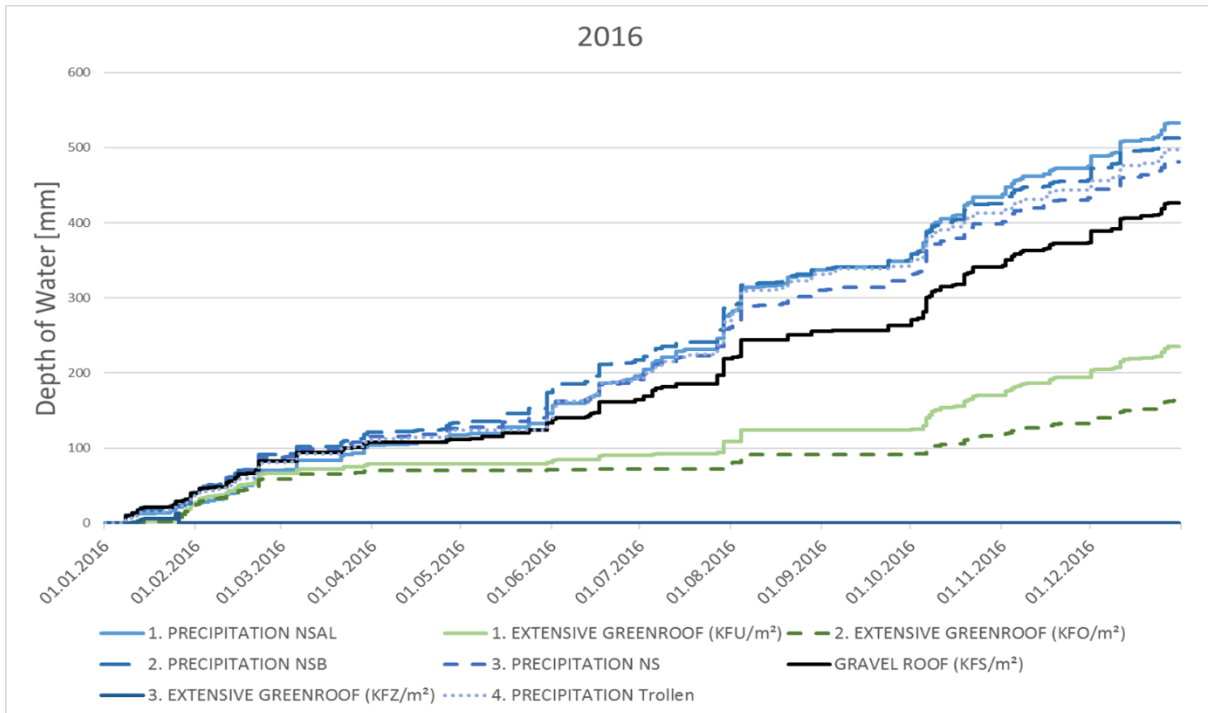


Abb. 31: 2016, Jahresniederschlag und Rückhalt von ext. Gründachaufbauten und einem Referenzkiesdach, gemessen und kalibriert an Großvolumenkippen (aufsummiert).

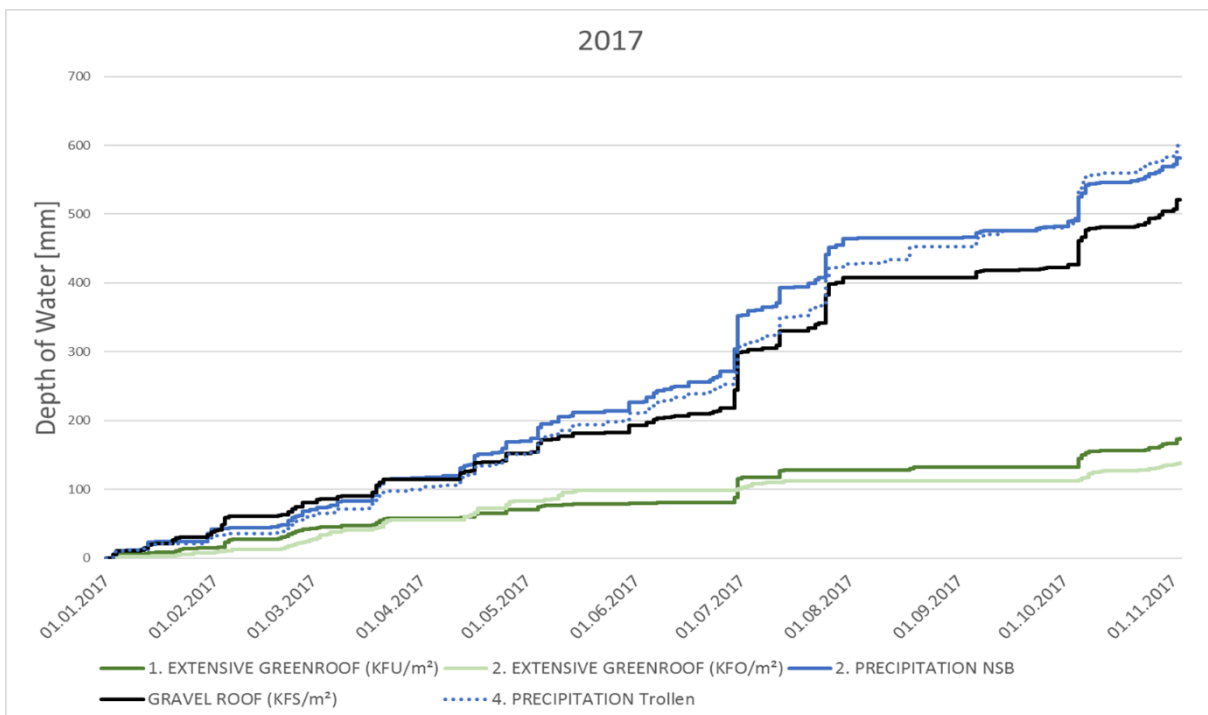
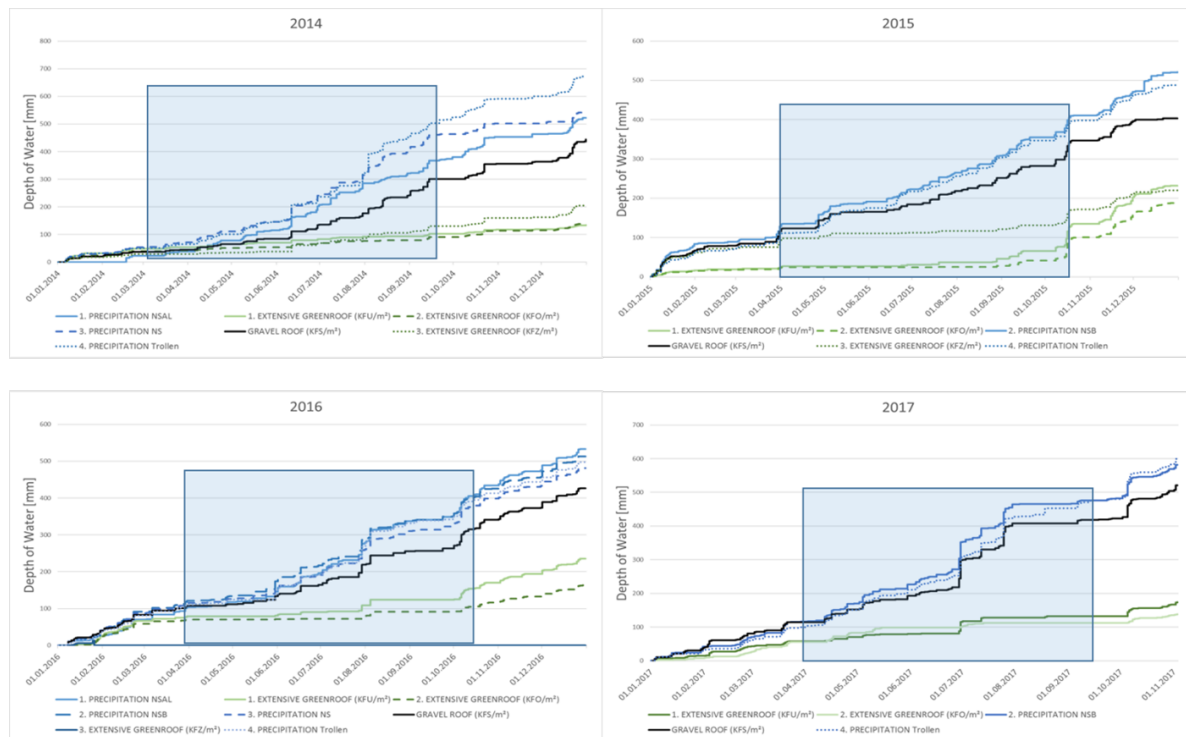


Abb. 32: 2017, Jahresniederschlag und Rückhalt von ext. Gründachaufbauten und einem Referenzkiesdach, gemessen und kalibriert an Großvolumenkippen (aufsummiert).

**Tab. 11: Jahresabflusswerte der Versuchsgründächer und dem Referenzkiesdach. Standort: Hochschule Neubrandenburg, Niederschlags: HSNB und Trollenhagen (DWD).**

Jahr	Niederschlag [mm]	Gravel roof (Kiesdach - KFS)		1.Green roof (EGD - KFU)		2.Green roof (EGS - KFO)		3.Green roof (EGD - KFZ)	
		Abfluss [mm]	Abfluss- koeffizient	Abfluss [mm]	Abfluss- koeffizient	Abfluss [mm]	Abfluss- koeffizient	Abfluss [mm]	Abfluss- koeffizient
2014	579,23	444,01	0,77	133,82	0,23	140,08	0,24	206,88	0,36
2015	505,37	403,79	0,80	231,53	0,46	187,76	0,37	220,13	0,44
2016	505,86	426,16	0,84	235,60	0,46	163,16	0,32		
2017	590,46	521,37	0,88	173,81	0,29	138,10	0,23		
Ø	545,23	448,83	0,82	193,69	0,35	157,27	0,29	144,50	0,26

### 5.6 Niederschlagsrückhalt in der Vegetationsperiode



**Abb. 33: Abflussverhalten der Versuchsgründächer in der Vegetationsperiode (blauer Rahmen).**

Die gemessenen Ablaufwerte lagen in den Jahren 2014 bis 2017 zwischen 8 und 26 % auf den extensiv begrünten Versuchsdachflächen, bei einem Niederschlag zwischen 231 bis 391 mm in der Vegetationsperiode (Abb. 34). Die Ablaufwerte des Referenzkiesdaches lagen zwischen 65 bis 81 % in der Vegetationsperiode (Tab. 12).

Aus der Abb. 33 geht hervor, dass es nur zu sehr wenigen Ablaufereignissen in der Vegetationsperiode auf den extensiven Dachbegrünungen kommt. Einen Großteil der Vegetationsperiode verdunsteten die Gründächer 100 % des Niederschlages. Die potentielle Verdunstungsleistung liegt aber weit höher.

Tab. 12: Abflussverhalten in der Vegetationsperiode.

Jahr	Niederschlag [mm]	Gravel roof (KFS)		1. Green roof (EGD - KFU)		Green roof (EGS - KFO)		Green roof (EGD - KFZ)	
		Abfluss [mm]	Abfluss- koeffizient	Abfluss [mm]	Abfluss- koeffizient	Abfluss [mm]	Abfluss- koeffizient	Abfluss [mm]	Abfluss- koeffizient
2014	391	256	0.65	48	0.12	48	0.12	101	0.26
2015	238	166	0.70	39	0.16	19	0.08	39	0.16
2016	231	155	0.67	45	0.19	21	0.09		
2017	380	307	0.81	74	0.19	56	0.15		
Ø	310	221	0.71	52	0.17	36	0.11	70	0.21

### 5.7 Errechneter und gemessener Niederschlagsabfluss

Der Vergleich von gemessenen und berechneten Daten ist in diesem Fall sinnvoll, denn die Gründächer der Hochschule Neubrandenburg werden schon seit dem Bau der Häuser 2 und 3 als Versuchsflächen für diverse Messungen genutzt. Unter anderem werden Niederschlag und Ablauf aufgezeichnet, die in dieser Arbeit mit errechneten Daten verglichen werden. Durch die Nachbildung der Gründächer der Hochschule Neubrandenburg soll überprüft werden, ob die Errechnung von Ablaufraten eine Alternative zu den Messungen auf den Dächern darstellt. Hierzu wird das Programm STORM.XXL, ein Programm zur Modellierung wasserwirtschaftlicher Systeme der Firma Sieker (Abb. 34), verwendet. Die extensiven Gründächer der Hochschule Neubrandenburg wurden mit Hilfe dieses Planungsinstruments nachgebildet, das Retentions- und Ablaufverhalten der realen Dächer wurde durch Implementierung von Regendaten abgebildet. Diese errechneten Datensätze werden dann gemeinsam mit den gemessenen Datenreihen der Jahre 2014 bis 2017 in Diagrammen dargestellt und miteinander verglichen.

Die Angaben in der Grafik beziehen sich auf den Untersuchungszeitraum 01. Januar 2014 bis 01. November 2017. Alle Angaben in diesem Diagramm sind in mm dargestellt.

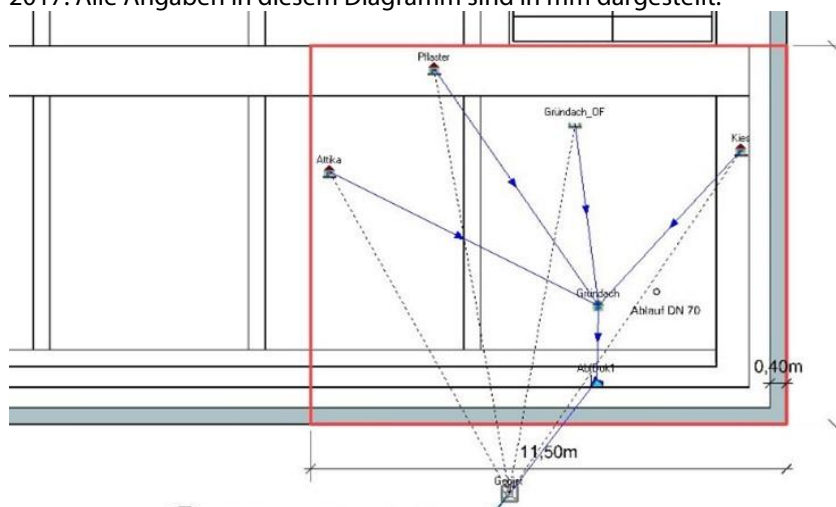
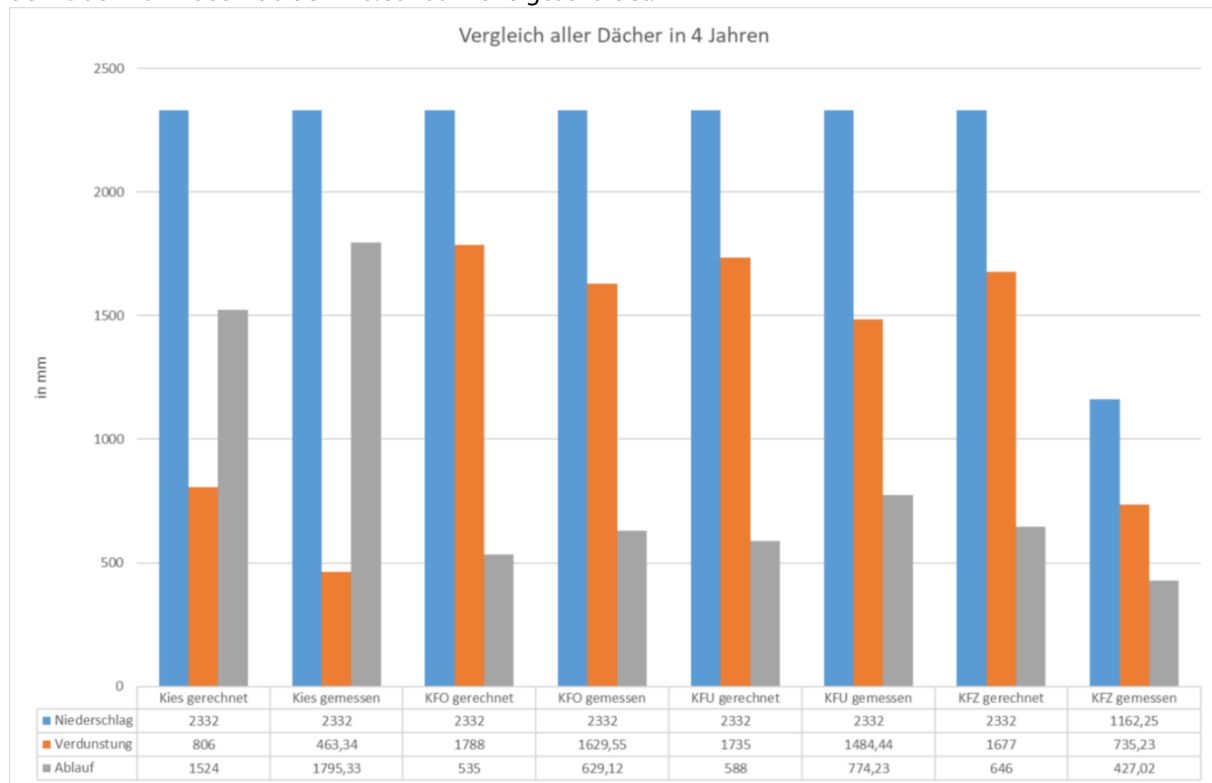


Abb. 34: Grafische Übertragung der Versuchsdachflächen (hier: KFZ) in STORM.XXL.

Auf der X-Achse sind in Abb. 35 die verschiedenen Dächer aufgezeigt. Sie sind in gemessene und gerechnete Datensätze unterteilt. Um einen direkten Vergleich zu haben, sind gemessene und berechnete Daten der entsprechenden Dächer direkt nebeneinander aufgezeigt.

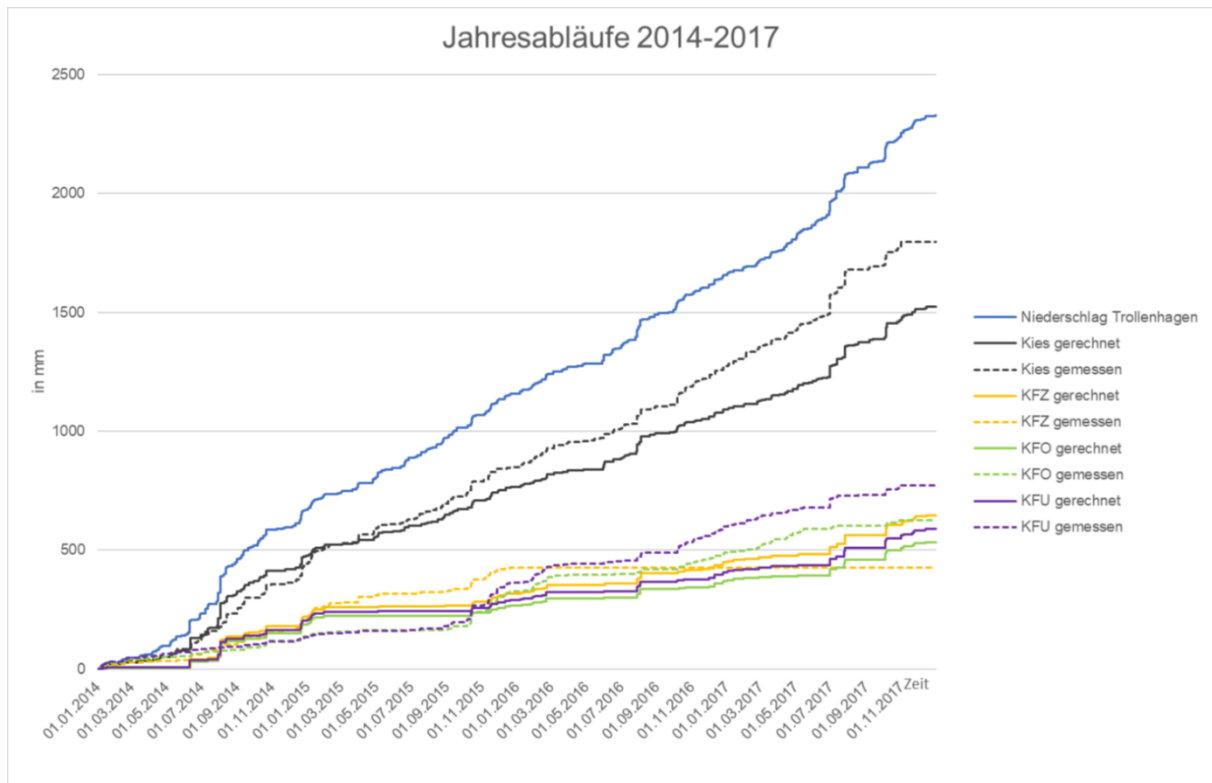
Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, ist der Niederschlag auf allen Dächern gleich. Das Dach „KFZ gemessen“ hat jedoch nur etwa halb so viel Niederschlag wie die anderen Dächer. Dies ist dem Ausfall der Messstation auf dem Dach von Haus 2 ab dem 26. Januar 2016 geschuldet.



**Abb. 35: Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Ablaufwerte.**

Generell ist anzumerken, dass die Daten der gemessenen Dächer mehr Ablauf aufweisen, als mit dem Programm STORM.XXL errechnet wurde (Abb. 35).

Der Vergleich der Verdunstung von „Kies gerechnet“ und „Kies gemessen“ zeigt, dass der errechnete Wert mit 806 mm höher ist als der gemessene Wert mit 463,34 mm. Eine mögliche Fehlerquelle in der hydrologischen Modellierung kann die fehlerhafte Darstellung der Interzeption an der Kiesoberfläche und der daraus resultierenden ETa. Die Verdunstungswerte von „KFO gerechnet“ und „KFO gemessen“, sowie „KFU gerechnet“ und „KFU gemessen“ liegen sehr viel näher beieinander als bei Kies (gerechnet und gemessen). „KFO gerechnet“ und „KFO gemessen“ liegen bei dieser Vierjahresbilanz 158,45 mm auseinander, die Differenz zwischen „KFU gerechnet“ und „KFU gemessen“ liegt bei 250 mm. „KFZ gerechnet“ und „KFZ gemessen“ lassen sich in diesem Fall aus o. g. Gründen nicht miteinander vergleichen (Abb. 36).



**Abb. 36:** Aufsummierung des Niederschlages und des Ablaufes (gerechnet und gemessen) für den Zeitraum 2014-2017.

Der Ablauf der Dächer hängt mit der Verdunstung direkt zusammen: Je mehr Ablauf desto weniger Verdunstung. Beim Vergleich der Abläufe der Datensätze „Kies gerechnet“ und „Kies gemessen“ lässt sich wiederum eine große Differenz von 271,33 mm feststellen. Bei den Ablaufwerten der Datensätze von „KFO gerechnet“ und „KFO gemessen“, sowie „KFU gerechnet“ und „KFU gemessen“ zeigt sich, wie bei der Verdunstung, nur eine kleine Differenz von 94,12 mm bei KFO und einer etwas größeren Differenz von 186,23 mm bei KFU.

Um die Dächer KFZ miteinander vergleichen zu können, wurden die Datensätze für die Auswertung in Prozent umgerechnet. Das bedeutet, dass bei einem angenommenen Niederschlag von 100 % „KFZ gemessen“ eine Verdunstung von 73 % (entsprechend einen Ablauf von 27 %, Endabflussbeiwert von 0,27) und „KFZ gerechnet“ eine Verdunstung von 63 % (Ablauf von 37 %, Endabflussbeiwert von 0,37) haben. Dies bestätigt die vorherige Aussage, dass die gemessenen Datensätze einen höheren Ablauf und eine geringere Verdunstung als die berechneten Daten haben. Gründe für diese „Fehlmessungen“ können Ungenauigkeiten bei der Softwareprogrammierung sein. Die Einbindung von Vegetation, Höhe und Verortung des Gründaches, Luftfeuchtigkeit und Luftaustausch, Pflegezustand und die daraus resultierenden ETa von Gründächern ist sehr komplex und nur schwer in die Software einzubinden. Hier können die gemittelten Tageswerte eine weitere Annäherung an die Verdunstungs- und Ablaufwerte liefern.

## 6 Temperaturreduzierung an der Dachabdichtung und Vegetationsdecke (Messung 2017)

Die Temperaturreduzierung an der Dachabdichtung und an der Substratoberfläche ist seit ca. 14 Jahren Bestandteil der Forschungsarbeit an der Hochschule Neubrandenburg.

Konventionelle Dächer (z. B. Bitumendach oder Kiesdach) unterliegen starken sommerlichen Temperaturschwankungen. Die Bitumendächer können dabei Temperaturen von bis zu 80 °C an der Oberfläche erreichen. Kiesdächer erreichen diese hohen Werte in der Regel nicht, führen aber aufgrund der hohen Wärmespeicherfähigkeit in den Nachtstunden zu einer zusätzlichen Wärmebelastung.



**Abb. 37:** Aufnahme vom 25.09.2018, im Hintergrund die bewässerte Dachfläche (36 m<sup>2</sup>), im Vordergrund die unbewässerte Dachfläche auf dem Gelände der ufaFabrik (Café) in Berlin.

Die tägliche Temperaturamplitude von extensiven Gründächern ist unter sommerlichen Bedingungen um ca. 50 % niedriger als die eines vergleichbaren Kiesdaches. Eine zusätzliche Temperaturreduzierung mit bewässerten Gründächern, besonders im Sommer, wäre denkbar. In trockenen und warmen Perioden kann ein Gründach seine Vorteile nicht voll ausspielen, wenn es komplett trockenfällt. Im schlechtesten Fall wirkt sich sommerlicher Hitzestress sogar negativ auf das Gründach und auf das Gebäude aus. Eine nächtliche Abkühlung wird durch die vergleichsweise hohe thermische Speicherfähigkeit (im Vergleich zu einem Schwarzdach) von Gründächern und durch den Verlust der adiabaten Kühlung erschwert. Die Potentiale einer sommerlichen Temperaturreduzierung durch eine zusätzliche Bewässerung eines Gründaches wurde in den Jahren 2017 und 2018 auf dem Gelände der ufaFabrik in Berlin (Abb. 37) bemessen.



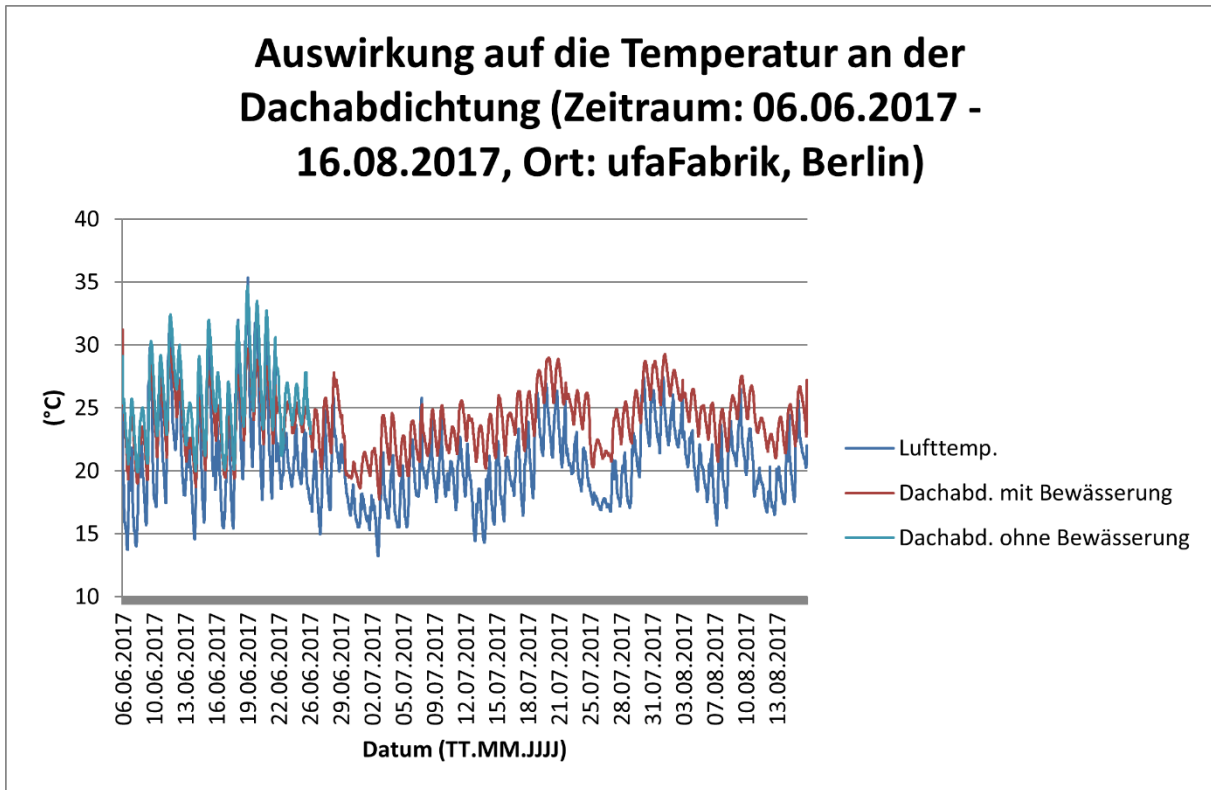


Abb. 38: Temperaturmessung vom 06.06. bis zum 16.08.2017. Messung mit LOG32, Datenausfall der Temperatur an der Dachabdichtung (unbewässert) ab dem 26.06.2017.

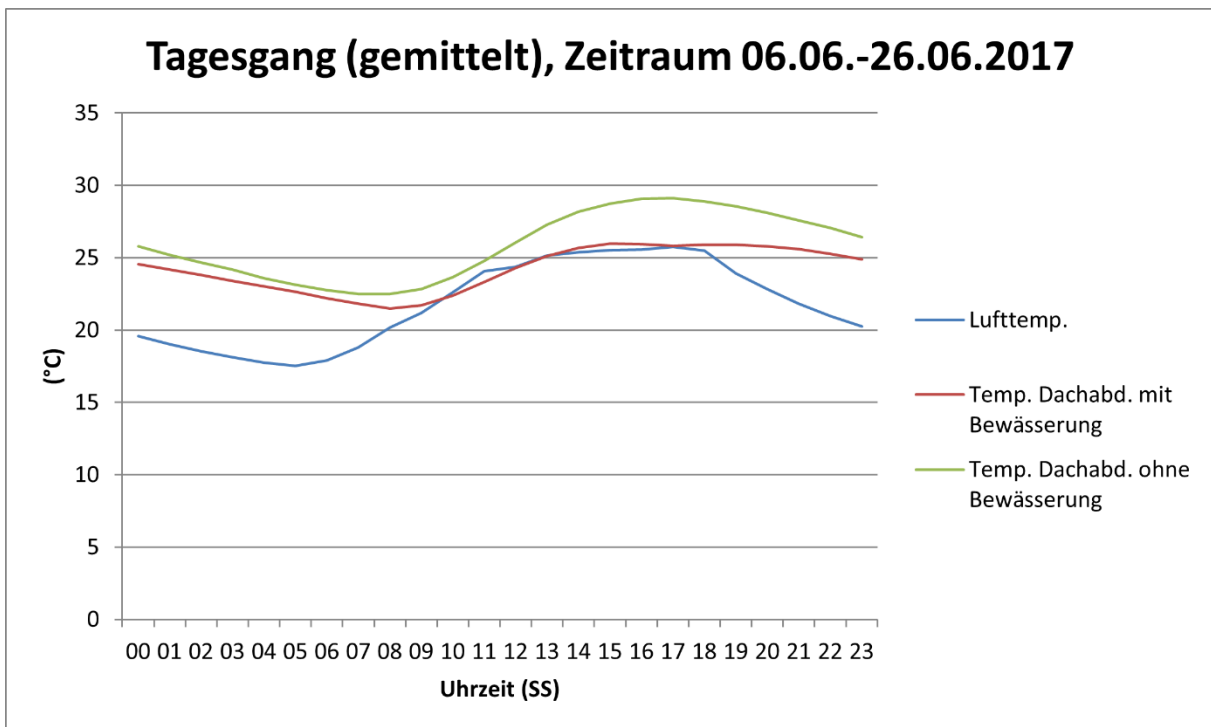


Abb. 39: Mittlerer Tagesgang (Zeitraum: 06.06.-26.06.2017) von der Temperatur an der Dachabdichtung. Datenausfall der Temperatur an der Dachabdichtung (unbewässert) ab dem 26.06.2017.

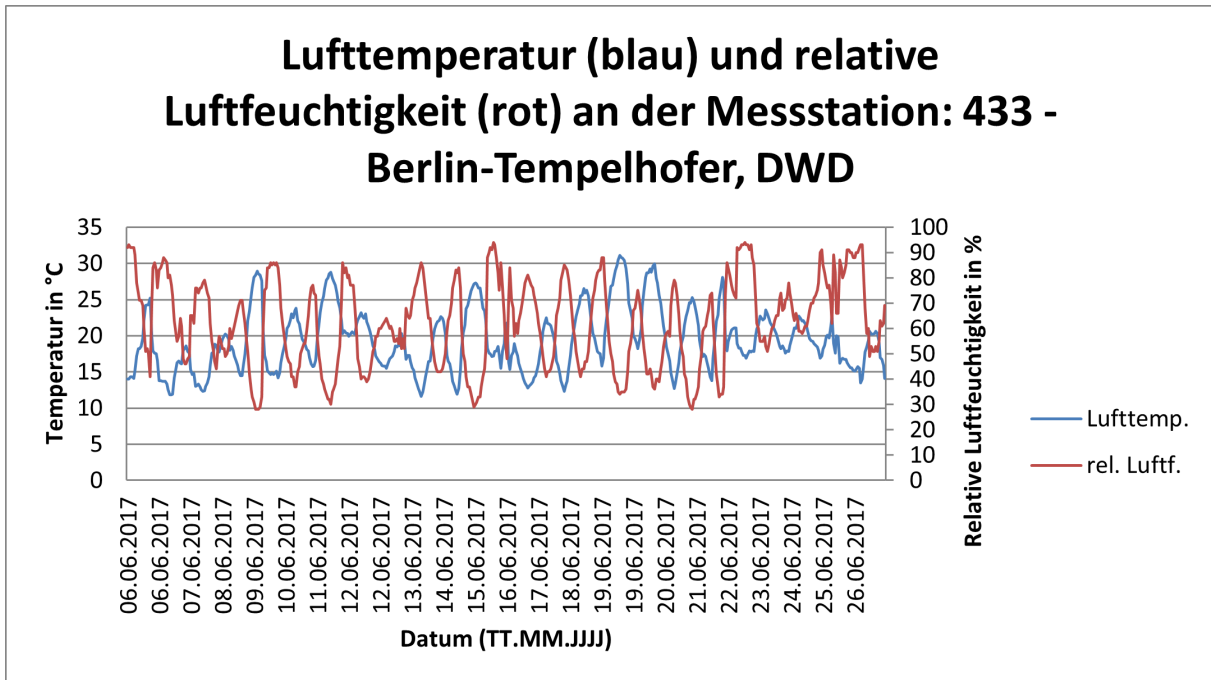


Abb. 40: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte an der Referenzmessstelle (DWD) auf dem Tempelhofer Feld in Berlin.

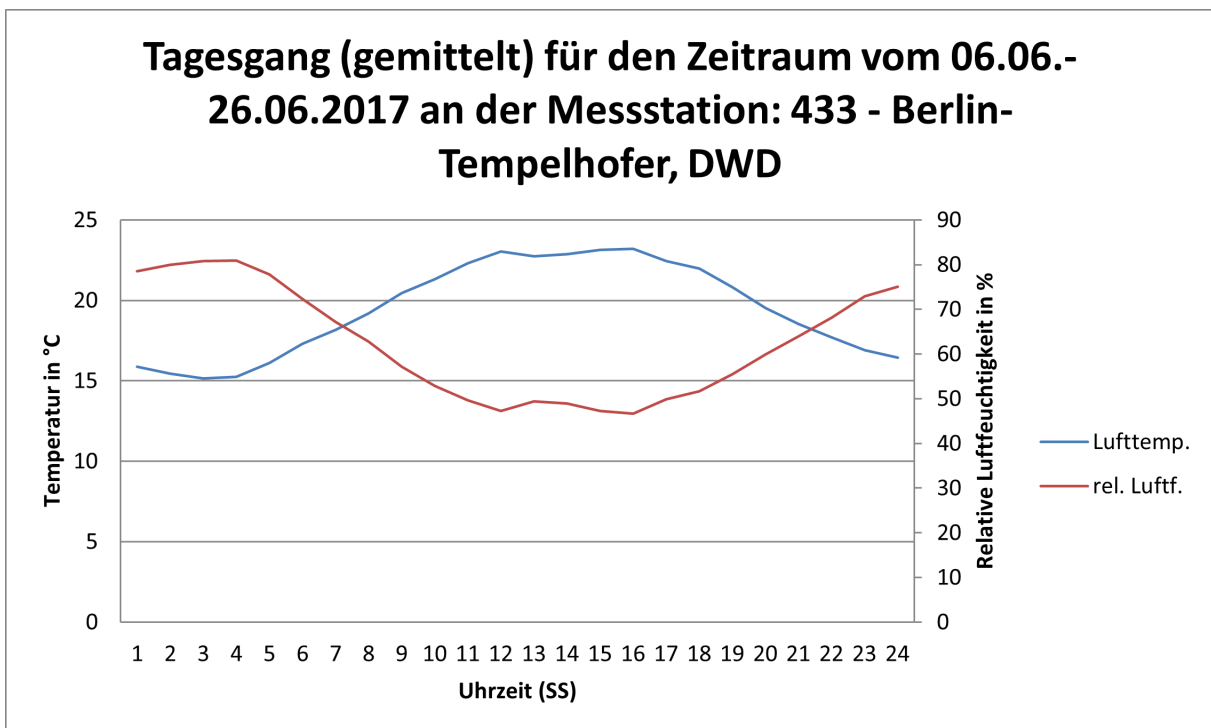


Abb. 41: Gemittelter Tagesgang der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit, Quelle: DWD.

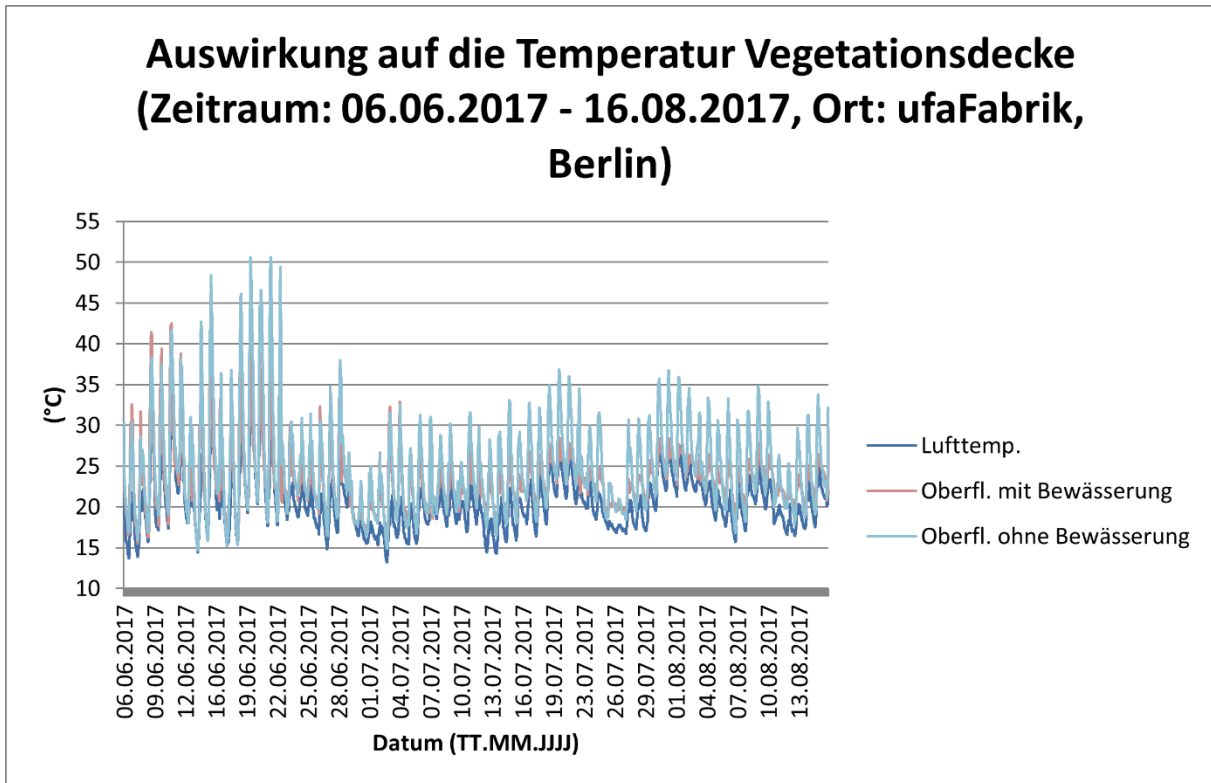


Abb. 42: Vergleich der Oberflächentemperatur von einem unbewässerten und einem bewässerten Gründach.

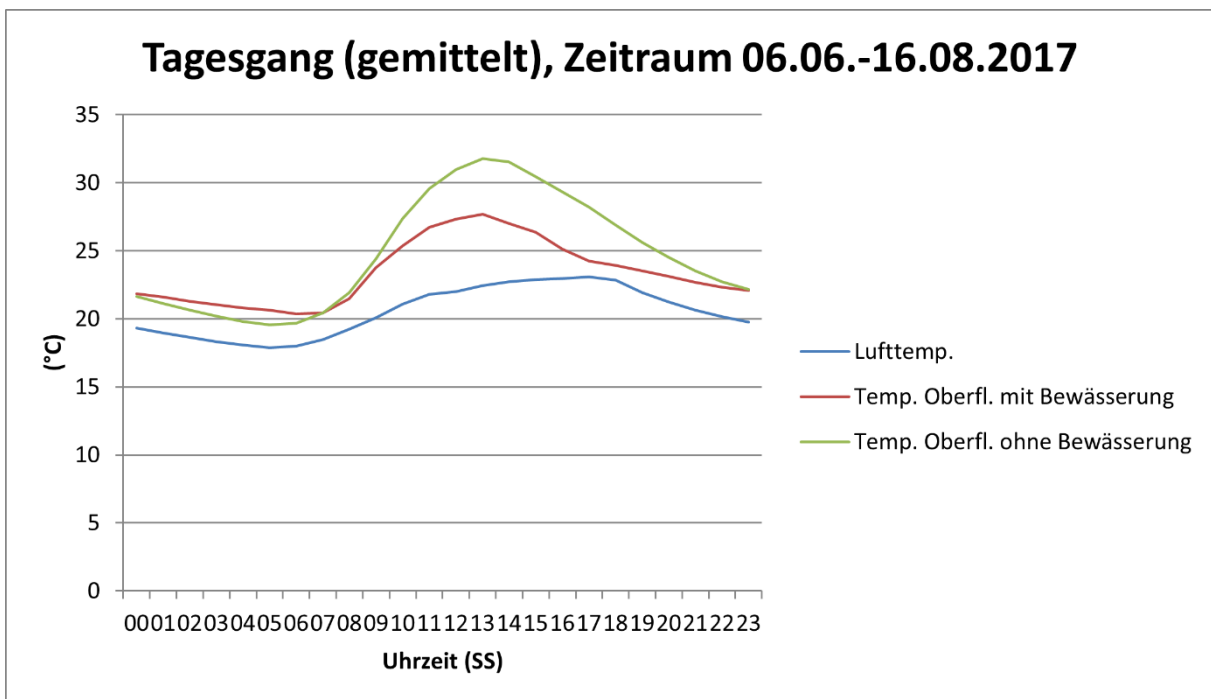


Abb. 43: Gemittelter Tagesgang der Oberflächentemperatur von einem unbewässerten und einem bewässerten Gründach.

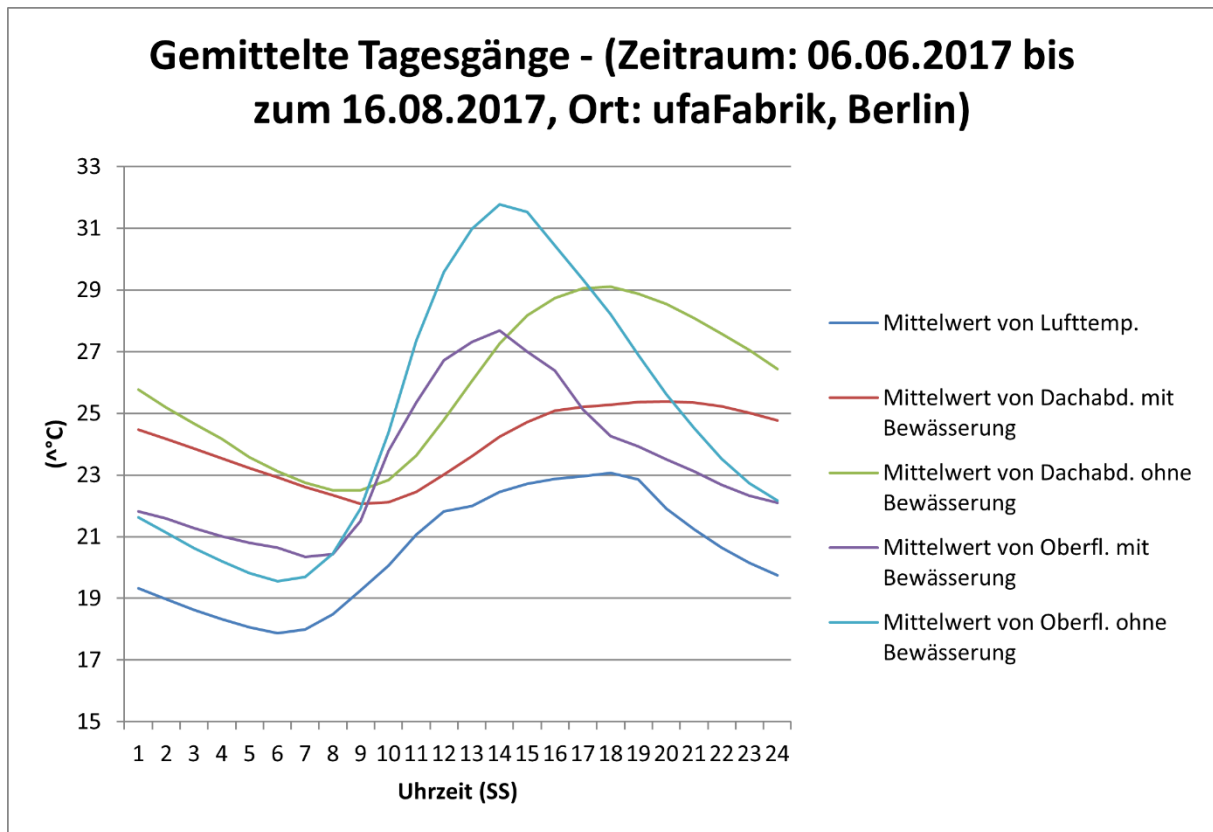


Abb. 44: Reduktion der Oberflächentemperatur und der Reduktion der Temperatur an der Dachabdichtung von bewässerten Gründächern und konventionellen unbewässerten Gründächern, gemessen an der UfaFabrik Berlin.

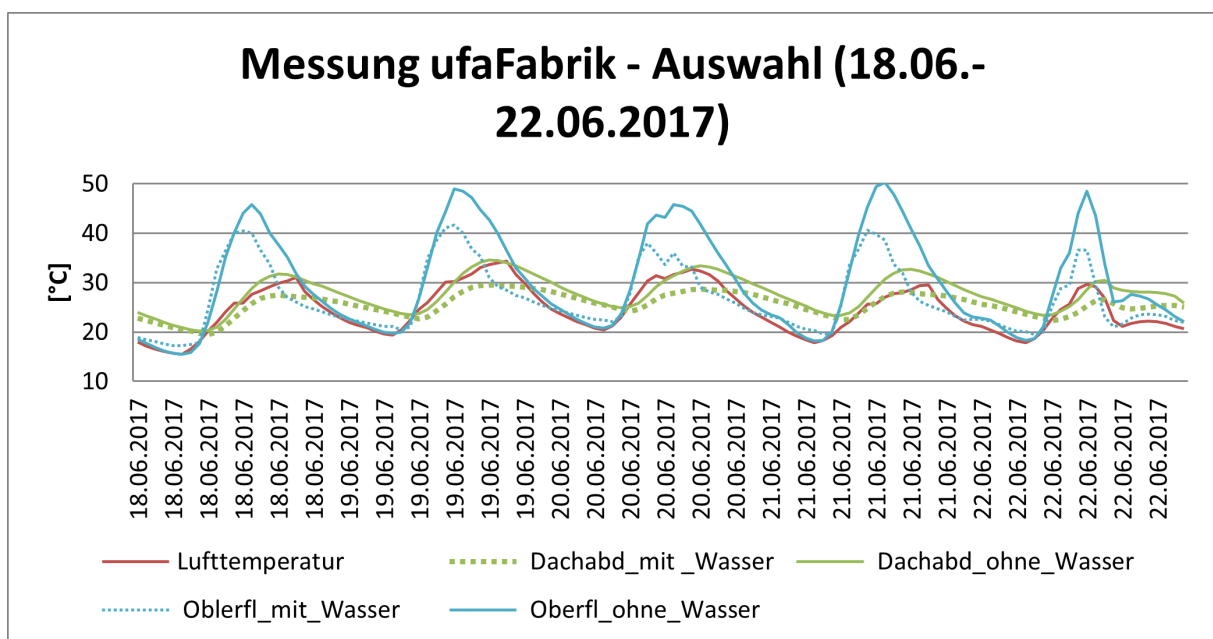


Abb. 45: Temperaturmessung und deren Reduzierung an der Dachabdichtung und der Vegetationsdecke durch den Einsatz von bewässerten Gründächern.

Durch die zusätzliche Bewässerung mit Niederschlagswasser aus einer Zisterne konnte die Temperatur deutlich um bis zu 10 K an der Oberfläche und um bis zu 4 K im Mittel an der Dachabdichtung reduziert werden. Resultat einer Bewässerung ist eine geringere Wärmebelastung für das Gebäude und einer Reduzierung der Temperaturamplitude für das oberste Geschoss (Abb. 40 und 45).

## 6.1 Temperaturmessungen an der Vegetationsdecke (Messung 2018)

In dieser Versuchsreihe sollte ein Temperaturgradient zwischen Dachabdichtung und Vegetationsdecke, in 50 cm und in 100 cm Höhe über dem Substrat ermittelt werden. Die eingesetzte Messtechnik und deren Speichermedien hielt den hohen Temperaturen auf dem Dach im Sommer 2017 nicht stand. So konnten nur Fragmente dieser Datensätze genutzt werden. Die Daten der Hitzeperiode 2018 liegen vollständig vor. Die ursprünglich geplante Messkampagne an der Dachabdichtung konnte nicht durchgeführt werden (Sensorausfall). In extremen Hitzeperioden konnte eine Abnahme der Lufttemperatur, gemessen auf einer Höhe von 50 cm über dem Substrat, um bis zu 18 K nachgewiesen werden. Eine Temperaturreduzierung in 100 cm Höhe über dem Substrat konnte in diesem Versuch nicht mehr nachgewiesen werden, da die Fläche des Versuchsaufbaus mit 36 m<sup>2</sup> zu klein war und in dieser Höhe zudem die Verdunstungskälte verweht wird.

In der Versuchsreihe vom 23. Juli bis zum 27. Juli 2018 auf dem Gelände der ufaFabrik in Berlin (Abb. 46) konnte an der Vegetationsdecke eine Temperaturreduzierung von 5 K über den Tag gemessen werden. In den Nachtstunden passte sich die Temperatur der bewässerten Gründachflächen der Temperatur des unbewässerten Gründaches an. Diese Temperaturreduzierung konnte auch schon im Jahr 2017 gemessen werden.

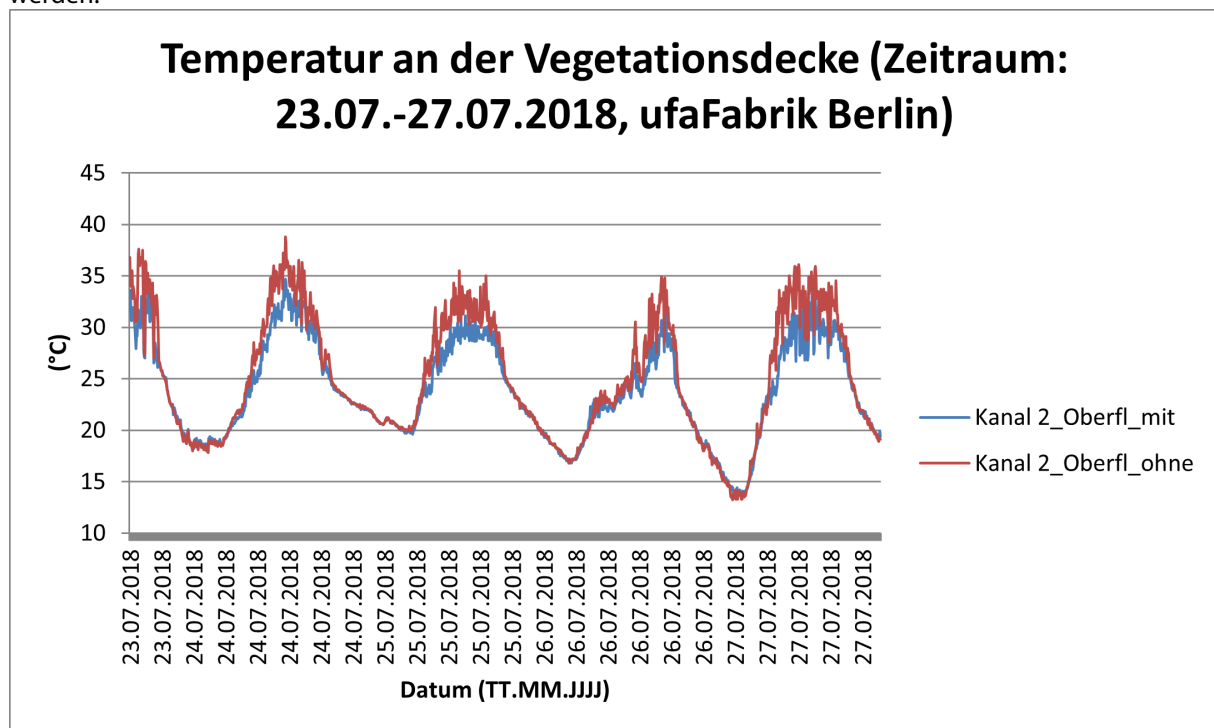
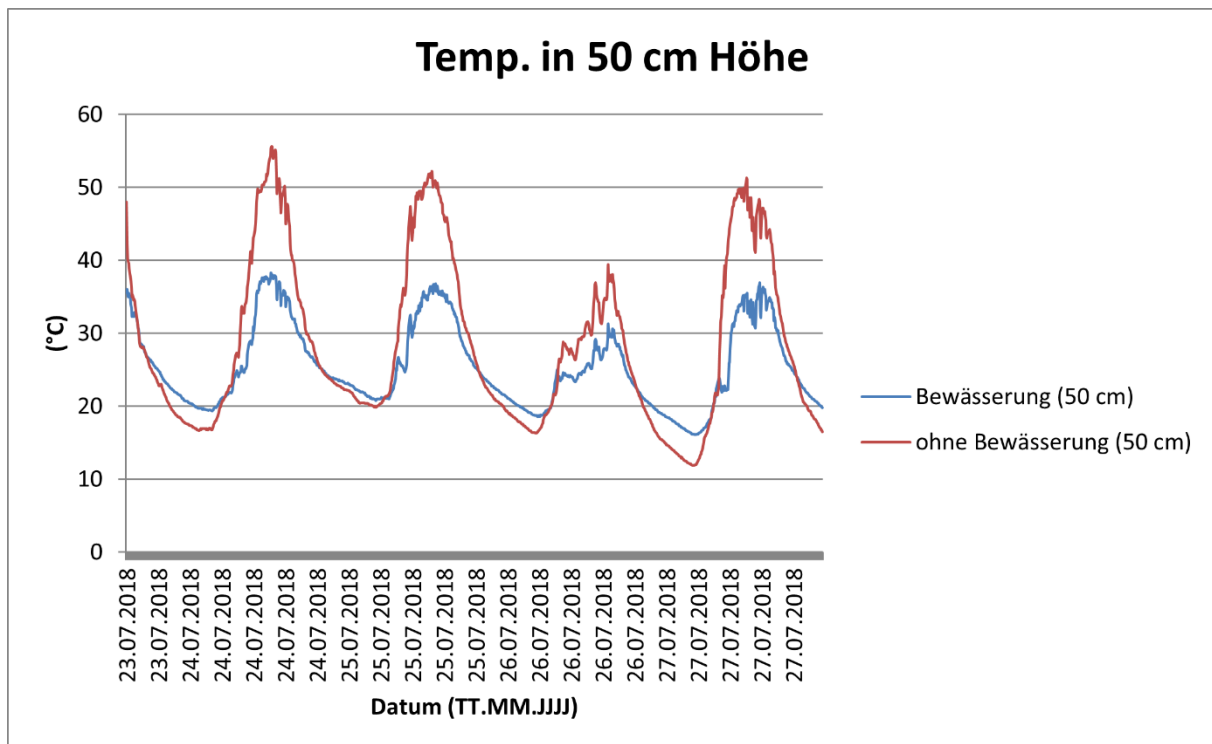


Abb. 46: Temperaturverlauf an der Vegetationsdecke. Maximale Temperatur am 25.07.2018 an der Wetterstation Tempelhof (ca. 5 km Luftlinie): 32,4 °C, Trockenperiode.

## 6.2 Temperaturreduzierung in 50 cm Höhe (Messung 2018)

In 50 cm Höhe über dem Substrat konnte in der Versuchsreihe vom 23. Juli bis zum 27. Juli 2018 eine deutliche Temperaturreduzierung gemessen werden. In der Mittagszeit lag die Reduktion bei bis zu 17 K. Die Grafik zeigt eine leicht niedrigere Temperatur in den Nachtstunden des unbewässerten Gründaches, dieser Effekt wird der höheren Wärmekapazität des bewässerten Gründaches zugeschrieben. Auch die höhere Vegetation (bis zu 50 cm hoch) reduziert den Luftaustausch in dieser Höhe mit der Umgebungsluft. Dahingegen lag die Höhe der Vegetation auf der unbewässerten Fläche bei nur 20 cm. Die Luftschicht zwischen Substrat und Vegetationsdecke ist bei den bewässerten extensive Gründächer besser vor Verwehungen geschützt (Abb. 47).



**Abb. 47:** Temperaturreduzierung durch bewässerte Gründächer in 50 cm Höhe, Reduktion der Temperatur um bis zu 15 K, Maximale Temperatur am 25.07.2018 an der Wetterstation Tempelhof (ca. 5 km Luftlinie): 32,4 °C, Trockenperiode.

Ein besonderes Augenmerk ist in diesem Zusammenhang auf die Vegetation zu legen, denn sie spielt eine wichtige Rolle. Durch die Bewässerung setzen sich Pflanzen mit einer erhöhten Verdunstungsleistung durch. Auf den Versuchsflächen der ufaFabrik dominierten nach zwei Jahren Bewässerung vor allem Wicken (*Vicia spec.*) und Gräser (*Poaceae*), die höhere Vegetationsdecken aufweisen. Die Vegetationsdecke, die bis zu 50 cm hoch aufgewachsen ist, kühlt auch höhere Luftschichten. In Abb. 47 wird eine Messung auf einer Höhe von 50 cm über der Substratschicht während der sommerlichen Monate dargestellt. Bewässerte Gründächer weisen eine Temperaturamplitude auf, die die Maximal- und Minimaltemperaturen noch weiter ausgleichen.



## 7 Abnahme der Verdunstungsleistung nach einer Bewässerung

Der Messaufbau gemäß Abb. 48 befand sich auf dem Dach der Hochschule Neubrandenburg (in ca. 15 m Höhe). In diesem Aufbau wurden verschiedene Bauweisen von extensiven Gründächern getestet. Die Neigung der Lysimeter wurden auf  $0^\circ$  eingestellt. Die Abmessungen für USB1\_O, USB2\_O, USB3\_O und USB4\_O betragen  $0,5 \text{ m}^2$  und  $0,25 \text{ m}^2$  für USB1\_K, USB2\_K, USB3\_K und USB4\_K (Tab. 13). Zur Berechnung und Vergleichbarkeit wurden die Abmessungen für alle Lysimeter auf  $1 \text{ m}^2$  skaliert. USB1-4\_K wurde im Jahr 2014 mit einer Tiefe von 16 cm und ohne Drainage gebaut. USB1-4\_K wurde im Jahr 2016 gebaut (Tab. 13). Der Niederschlag wurde mit einem Ombrometer mit einer Genauigkeit von 0,01 mm gemessen.



Abb. 48: Wiegende Kleinlysimeter zur Bemessung der ET<sub>a</sub>.

Tab. 13: Bezeichnung und Aufbau der wiegenden Kleinlysimeter

Bezeichnung	Vlies		Dränelement		Vlies		Substrat		Vegetation		Ø	
	Höhe (cm)	Max. Wasserkapazität (kg)	Höhe (cm)	Max. Wasserkapazität (kg)	Höhe (cm)	Max. Wasserkapazität (kg)	Höhe (cm)	Max. Wasserkapazität (kg)	Höhe (cm)	Max. Wasserkapazität (kg)	Höhe (cm)	Max. Wasserkapazität (kg)
USB1_O	0,28	0,58	2,5	1,28	0,1	0	6	21,6		2,5	8,88	24,95
USB2_O	0,28	0,58	2,5	1,28	0,1	0	12	43,2		2,5	14,88	47,55
			Retentionsmodul									
USB3_O	0,28	0,58	8,5	0,38	0,1	0	12	43,2		2,5	20,88	46,65
USB4_O (3.5 cm Anstau)	0,28	0,58	8,5	10,15	0,1	0	12	43,2		2,5	20,88	56,43
USB1-3_K	0,1	0					16	57,6		2,5	16,1	60,1
							Kiesdach					
USB4_K							10	80			10	80

Die Bewässerungen (drei Wiederholungen) mit einer Rate von 37,5 l/m<sup>2</sup> wurden im Juli/August 2018 auf den trockenen Dachlysimetern durchgeführt. Der Zeitraum zwischen dem 24. Juli und dem 20. August 2018 hatte eine Durchschnittstemperatur von 22,4 °C. Die Rückhalteraten sind in Tab. 14 dokumentiert. Die Gründächer und das Referenzkiesdach wurden im Juli und August 2018 dreimal mit Wasser gesättigt. Es wurde jeweils eine Gesamtwassermenge von 37,5 l/m<sup>2</sup> verwendet. Der Zeitraum vom 24. Juli bis 20. August 2018 war ein besonders warmer und trockener Zeitraum mit sehr wenig Niederschlag in den Sommermonaten. In dieser Zeit (24.07. - 20.08.2018) fielen nur 3,6 mm (l/m<sup>2</sup>) Niederschlag. Die tägliche Durchschnittstemperatur lag zwischen 19,4 und 28,2 °C (Ø 22,4 °C). Die Wasserrückhaltekapazitäten der verschiedenen EGDs während dieses Zeitraums sind in der Tab. 14 aufgezeigt.

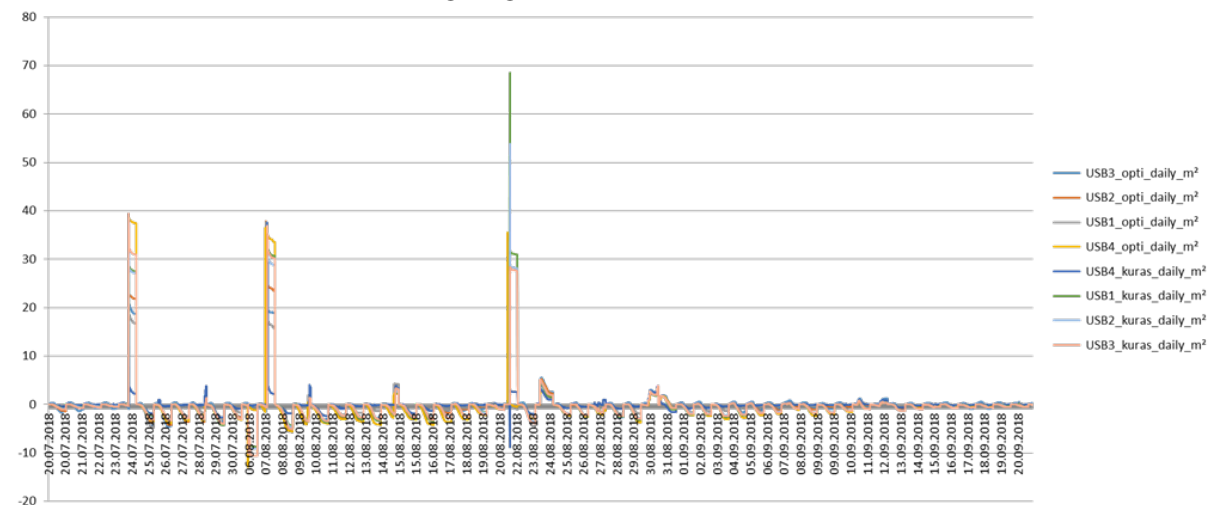


Abb. 49: Übersicht über die drei Bewässerungstermine und deren tägliche Verdunstungsleistung.

Die tägliche Verdunstungsleistung gibt Aufschluss über die nötige Häufigkeit einer zusätzlichen Bewässerung. Ist das Ziel, die ET auf einem nahezu maximalen Level zu halten, so ist bei Dachaufbauten unter 10 cm eine tägliche Bewässerung vorzusehen. Dachbegrünungssysteme mit 16 cm Substrataufbau oder verbaute Retentionskörper mit Kapillaraufstieg, können das Bewässerungsintervall verlängern. Während

dünnschichtige Aufbauten (8 cm) schon nach 7 Tagen ihre Verdunstungsleistung von  $4,3 \text{ l/m}^2$  auf  $1,7 \text{ l/m}^2$  reduzieren, beanspruchen Systeme mit höherem Substrataufbau (z.B. 16 cm) ein längeres Bewässerungsintervall. Ein 3,5 cm Anstau von Niederschlagswasser in einem Retentionskörpern und einer eingebauten Kapillarverbindung zum Substrat ermöglichen über einen langen Zeitraum eine erhöhte tägliche Verdunstungsrate (Abb. 49).

## 7.1 Maximale Aufsättigung

Die erste Bewässerung wurde am 24. Juli 2018 durchgeführt. Das Gründachsystem war vollständig ausgetrocknet und die tägliche Verdunstungskapazität (ETa) betrug maximal  $0,5 \text{ l/m}^2$  pro Tag. Über einen Zeitraum von sieben Tagen bis zur nächsten Bewässerung des Daches kam es zu einer signifikanten Abnahme der Verdunstungskapazität. Die zweite Bewässerung wurde am 7. August 2018 durchgeführt. Während eines Zeitraums von 14 Tagen wurde eine merkliche Abnahme des täglichen ETa beobachtet (Abb. 49). Während dieser Zeit verringerte sich der ETa von  $5 \text{ l/m}^2 / \text{Tag}$  (z. B. USB4\_O, 8. August 2018) auf fast  $2 \text{ l/m}^2 / \text{Tag}$ . Die dritte Bewässerung wurde am 22. August 2019 durchgeführt. Dies ermöglichte es, die tägliche ETa über einen Zeitraum von 30 Tagen mit hohen Spätsommertemperaturen und sehr wenig Niederschlag zu betrachten (Tab. 14).

Tab. 14: Abflussmessungen an den wiegenden Kleinlysometern, der Abfluss wurde mittels Gewichtsverlustes bestimmt.

Bezeichnung	1. Durchgang 37,5 l/m <sup>2</sup> ± 1 l/m <sup>2</sup> (Substrat komplett trocken)	2. Durchgang 37,5 l/m <sup>2</sup> ± 1 l/m <sup>2</sup> (nach 8 Tagen)	3. Durchgang 37,5 l/m <sup>2</sup> ± 1 l/m <sup>2</sup> (nach 14 Tagen, Substrat trocken)	1. Abfluss [mm]	2. Abfluss [mm]	3. Abfluss [mm]	1. Abflusskoeffizient	2. Abflusskoeffizient	3. Abflusskoeffizient	Ø Abflusskoeffizient
USB1O	16,761	20,01	17,67	20,739	17,49	19,83	0,55	0,47	0,53	0,52
USB2O	21,76	25,95	24,48	15,74	11,55	13,02	0,42	0,31	0,35	0,36
USB3O	18,74	20,9	20,05	18,76	16,6	17,45	0,50	0,44	0,47	0,47
USB4O	37,68	36,45	34,51	-0,18	1,05	2,99	0,00	0,03	0,08	0,03
USB1K	27,48	32,29	31,67	10,02	5,21	5,83	0,27	0,14	0,16	0,19
USB2K	27,12	30,91	28,8	10,38	6,59	8,7	0,28	0,18	0,23	0,23
USB3K	30,98	31,82	28,45	6,52	5,68	9,05	0,17	0,15	0,24	0,19
USB4K	2,216	4,38	3,09	35,284	33,12	34,41	0,94	0,88	0,92	0,91

Der Ablauf einer Wasserspende von  $37,5 \text{ l/m}^2$ , auf die unterschiedlichen Dachbegrünungssysteme erzeugt einen Ablauf zwischen 55 % und 0 % (Kiesdach 94 %). Die tägliche Verdunstung unterstreicht die Notwendigkeit einer zusätzlichen Bewässerung in anhaltenden Trockenphasen. Wenn das ETa auf einem fast maximalen Niveau gehalten werden soll, sollten Dachkonstruktionen mit einer Tiefe von weniger als 10 cm täglich bewässert werden. Bei Gründachsystemen mit 16 cm Untergrund oder auch bei solchen, die in Rückhaltekörper mit Kapillarerhöhung eingebaut sind, kann das Bewässerungsintervall verlängert werden. In 7 Tagen reduzierte ein Dach mit einer dünnen Substratschicht (8 cm) den ETa von 4,3 auf  $1,7 \text{ l/m}^2$ . Systeme mit einer dickeren Substratschicht (16 cm) benötigen intensive und längere Bewässerungsintervalle. Ein Wasserretentionsniveau von 3,5 cm in einer Retentionsbox mit integriertem kapillarem Anstieg zum Substrat ermöglichte eine bessere ETa über einen längeren Zeitraum (Abb. 50-52). Die Messwerte wurden täglich um 00:00 Uhr wieder auf 0 kg gesetzt, um die tägliche ETa zu veranschaulichen.

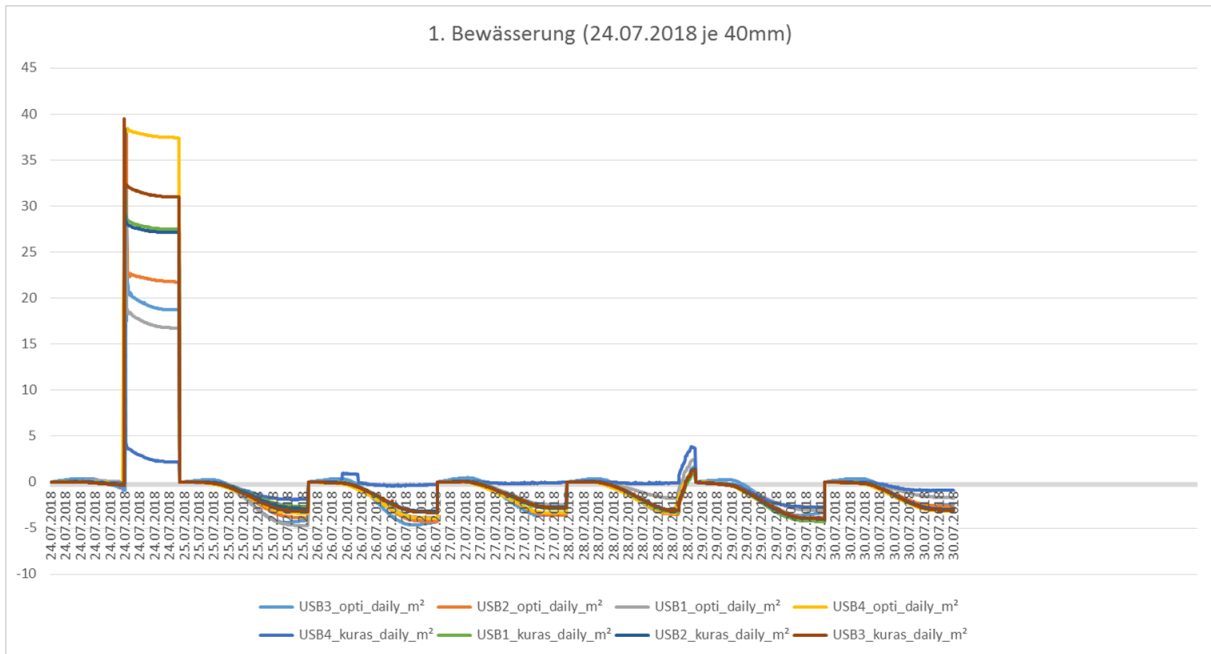


Abb. 50: ET<sub>a</sub> nach der ersten Bewässerung mit 37,5 l/m<sup>2</sup>

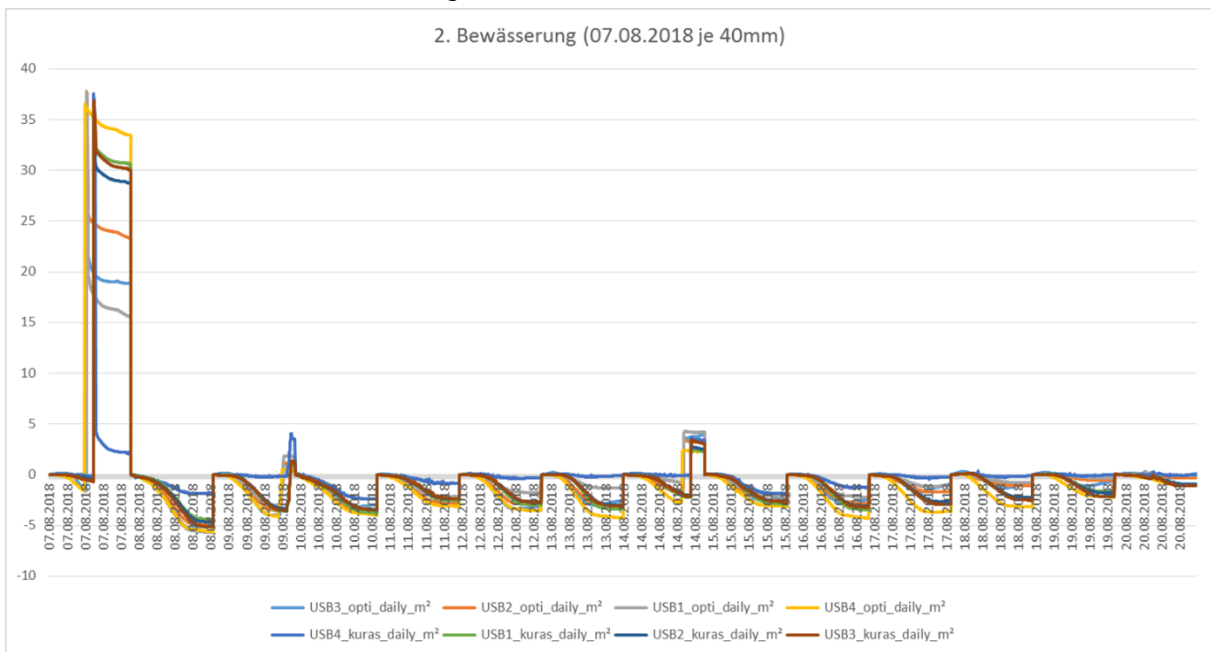


Abb. 51: ET<sub>a</sub> nach der zweiten Bewässerung mit 37,5 l/m<sup>2</sup>.



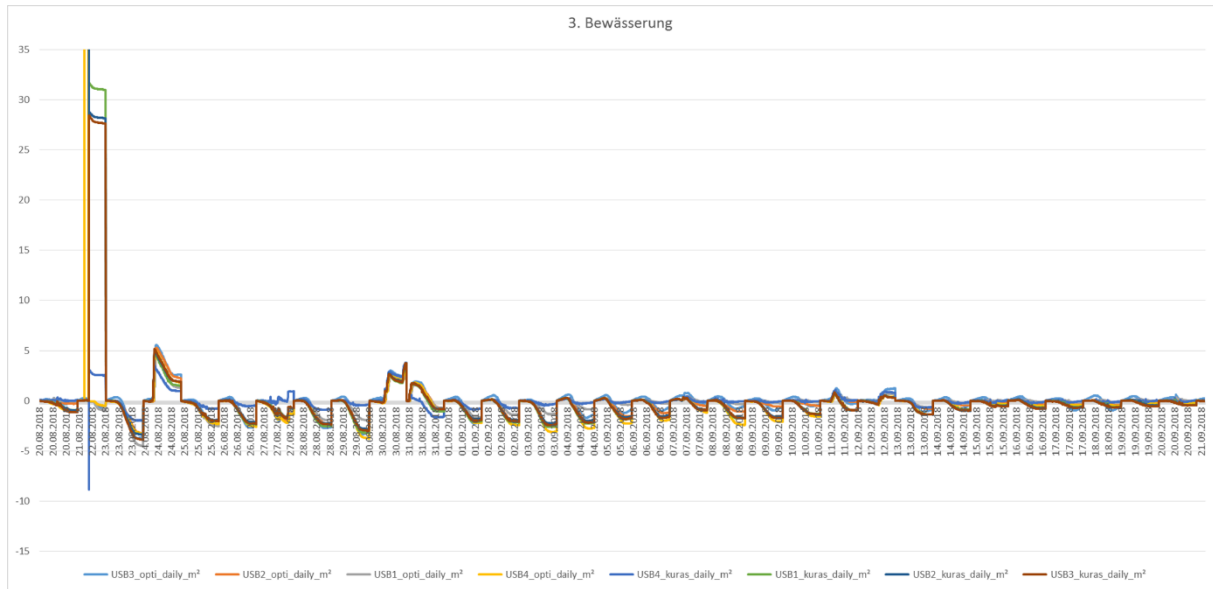
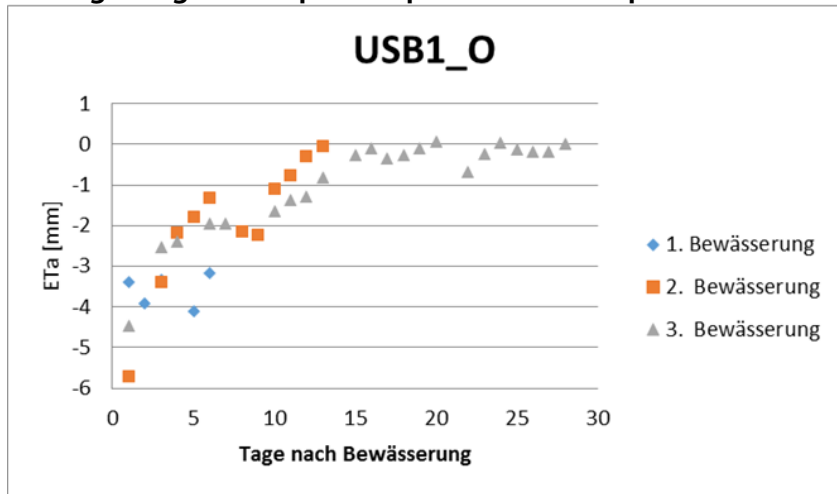
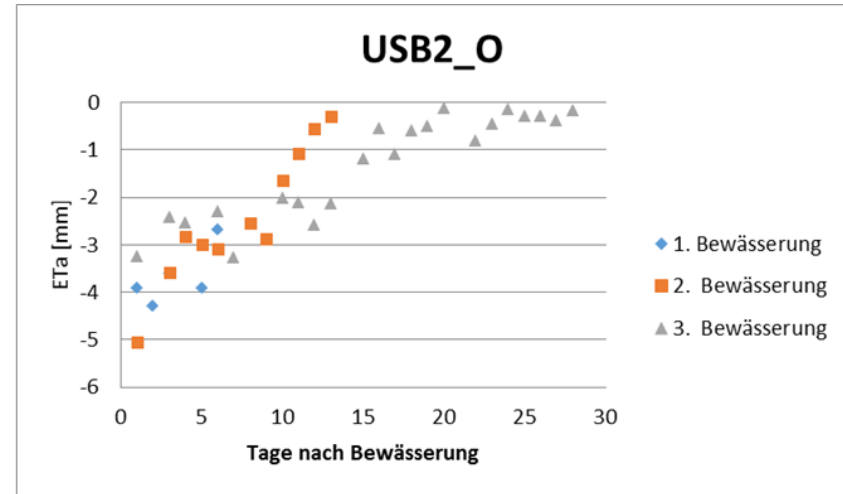


Abb. 52: ET<sub>a</sub> nach der dritten und letzten Bewässerung.

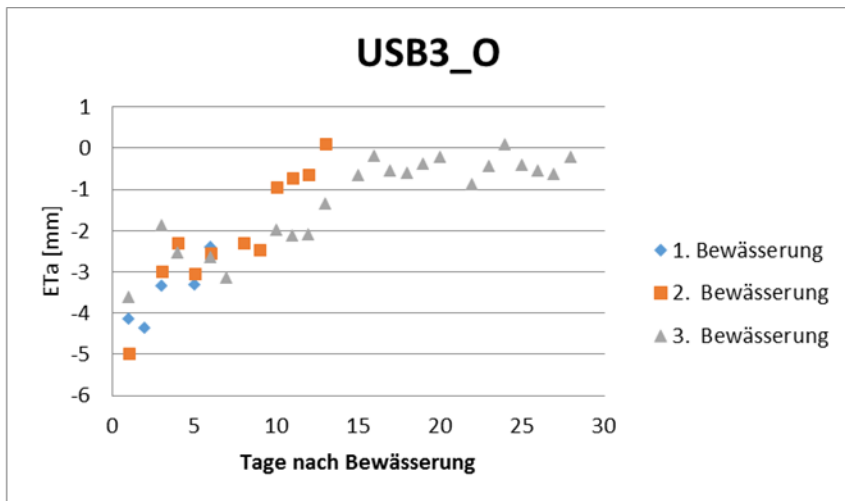
### 7.2 Steigerung der Evapotranspiration in Hitzeperioden von extensiven Gründächern



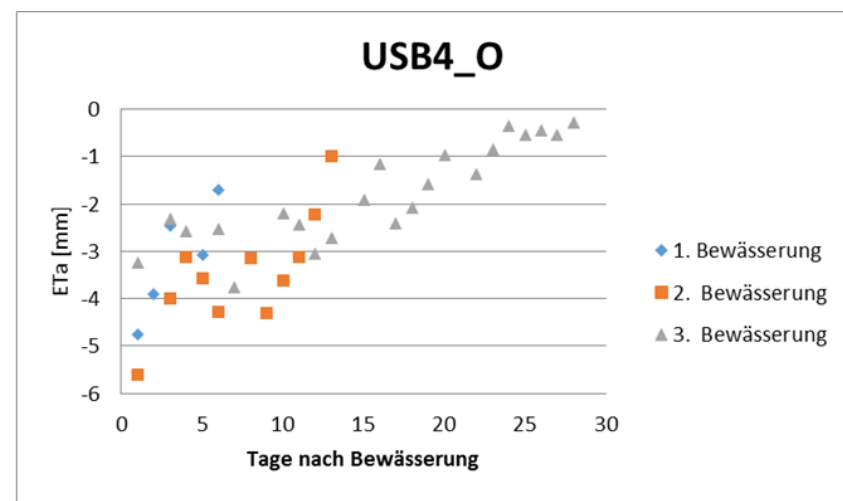
a



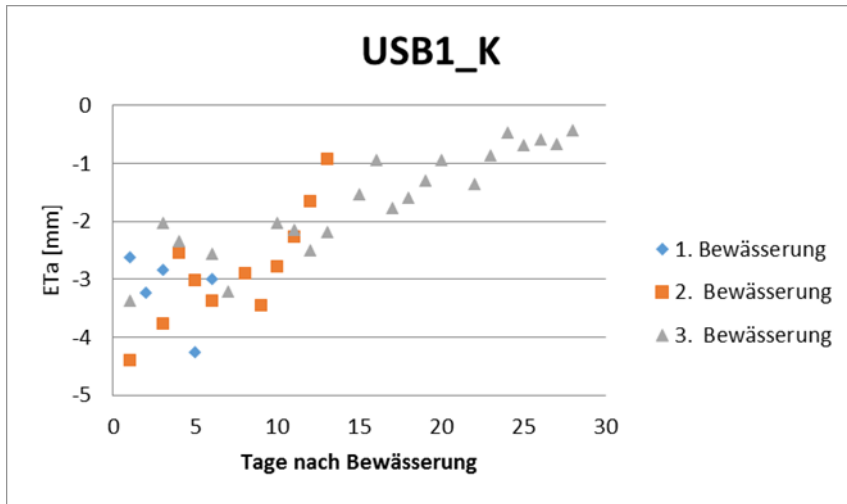
b



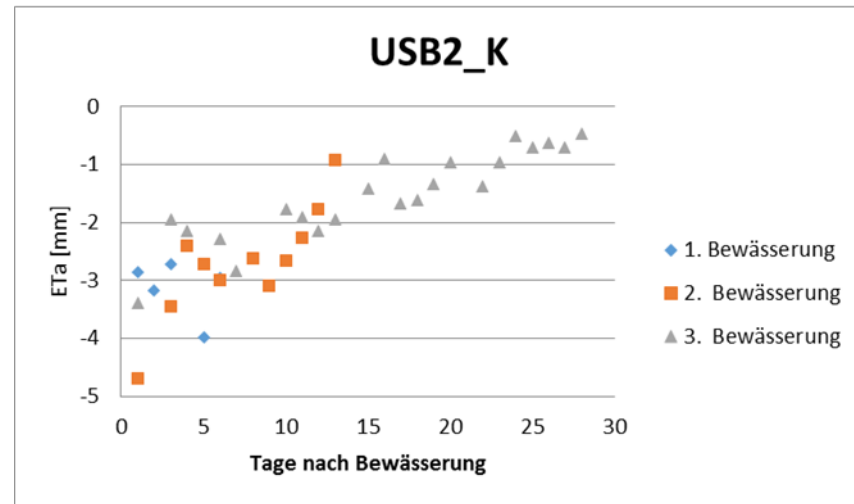
c



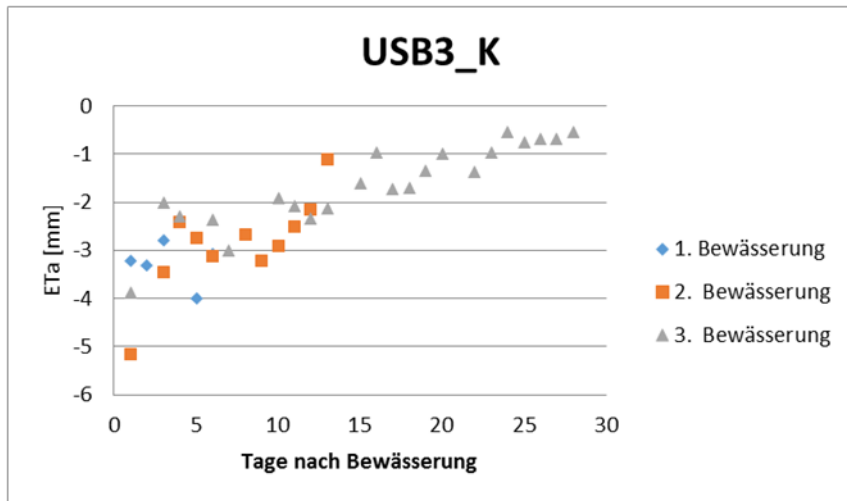
d



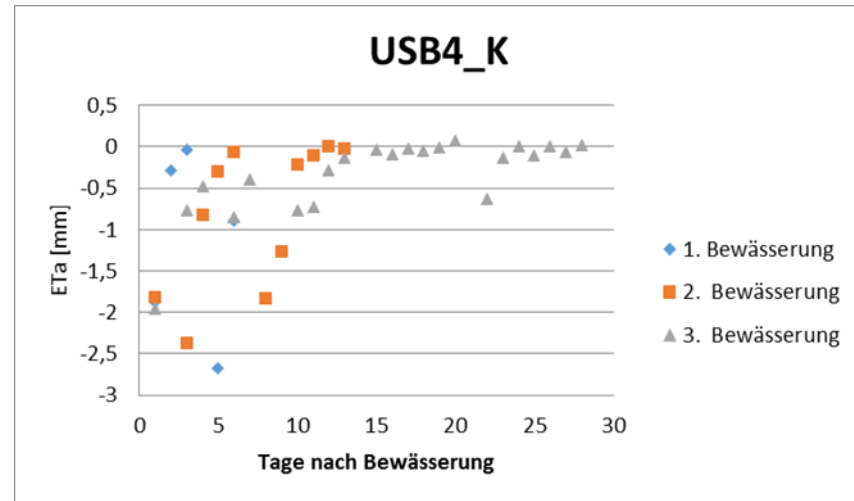
e



f



g



h

Abb. 53 (a – h): Verringerung der täglichen  $ET_a$  nach den drei Bewässerungsperioden.

Systeme mit höherem Substrat- und/oder Anstau weisen über einen längeren Zeitraum eine hohe ETa auf. (a) USB1\_O = EGD mit 8,88 cm Bodentiefe; (b) USB2\_O = EGD mit 14,88 cm Bodentiefe; (c) USB3\_O = EGR mit 20,88 cm Bodentiefe; (d) USB4\_O = EGR mit 20,88 cm Bodentiefe und 3,5 cm Anstau; (e-g) USB1\_K, USB2\_K, USB3\_K = EGD mit 16,10 cm Bodentiefe, USB4\_K = Referenzkiesdach mit 10,00 cm Tiefe.

Durch die Bewässerung in der Hitzeperiode 2019 (Juli-August), konnte die ETa von max. 0,5 mm/Tag auf bis zu 5 mm/Tag erhöht werden (Abb. 53 a-h). Bei dauerhafter Bewässerung sind Werte, in dieser Größenordnung, bei allen Gründachaufbauten vorstellbar. Der Einsatz von Retentionskörpern (mit Kapillaraufstieg) zur passiven Bewässerung hat sich als bewährte Methode erwiesen (Abb. 54).

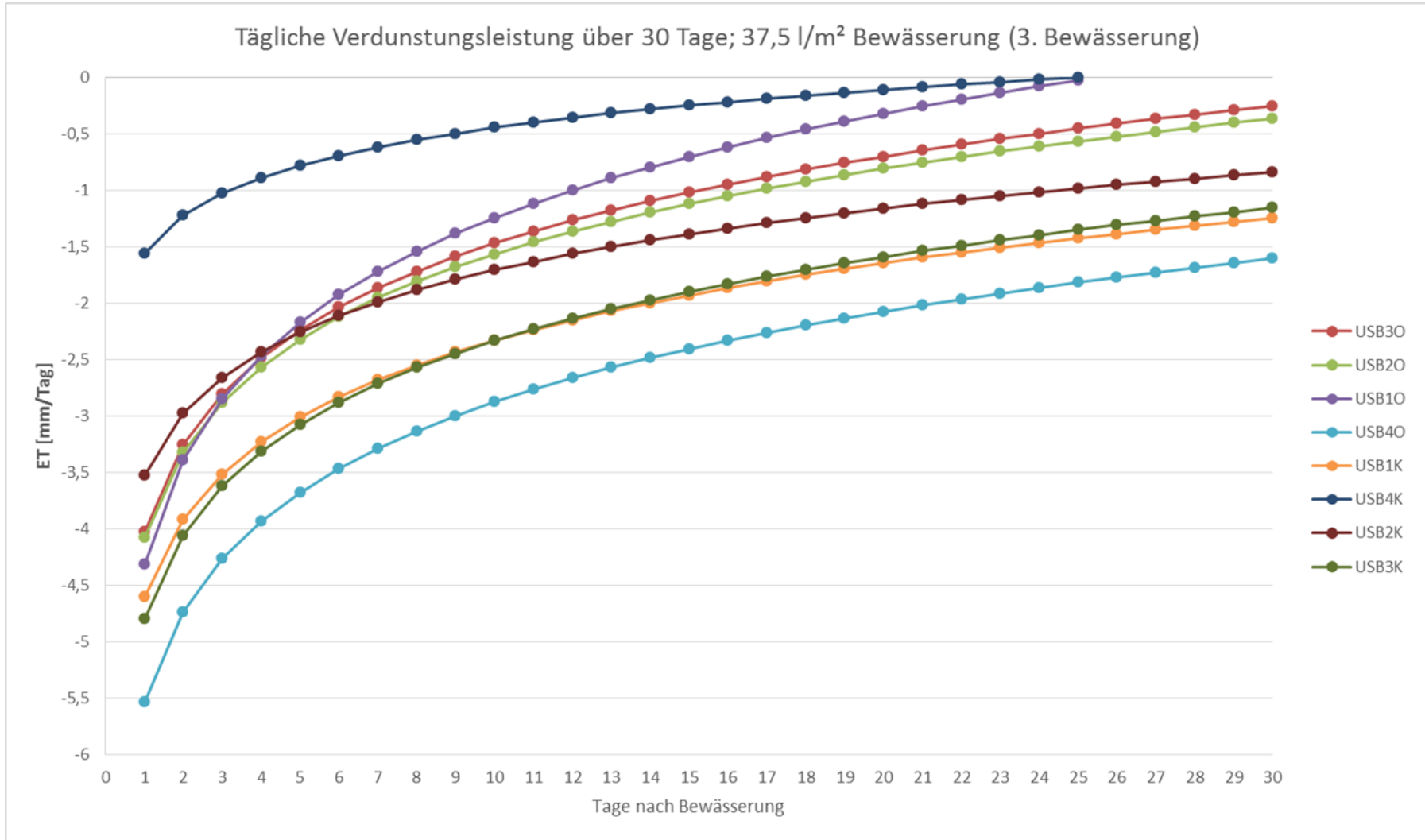


Abb. 54: Abnahme der täglichen ET<sub>a</sub> über 30 Tage bei wenig Niederschlag.

## 8 Potentielle Kühlleistung im Stadtraum

Die städtische Erwärmung hängt signifikant mit dem Verlust von Vegetationsflächen zusammen. Die Verdampfungsenergie von 1 g Wasser beträgt 2.441 J/g, (bei 25 °C, Verdampfungsenthalpie 43,990 kJ mol<sup>-1</sup>, H<sub>2</sub>O: 18,02 g/mol), die Verdampfungsenergie von 1 kg Wasser beträgt demnach ~0,68 kWh. Konventionelle Gründächer leisten hier schon einen Beitrag mit ca. 1,5 kg Wasser pro m<sup>2</sup>/Tag, das entspricht ca. 0,94 kWh Verdampfungsenergie pro m<sup>2</sup>/Tag. Die Versuche haben gezeigt, dass die Verdunstungsleistung in der Sommerperiode auf bis zu 5 kg/m<sup>2</sup>/Tag dauerhaft gesteigert werden kann. Bei der Hochrechnung dieser Werte auf die Sommerperiode (21.06.-22.09.) lagen die Werte zwischen 330,88 und 519 kg/m<sup>2</sup> für 92 Tage. Bei einer Gründachgröße von 100 m<sup>2</sup> läge die Spanne des verdunsteten Wassers zwischen 33,06 bis 51,98 m<sup>3</sup> Wasser. Die produzierte Verdampfungsenergie läge zwischen 22.480,8 bis 35.346,4 kWh (22,48 - 35,34 MWh) für eine bewässerte Dachfläche von 100 m<sup>2</sup>, je nach Systemaufbau (Tab.: 15).

Eine Hochrechnung auf den gesamtstädtischen Raum kann nur eine Annäherung an die potentielle Verdunstungsleistung durch bewässerte Gründächer liefern. Die Stadt Berlin hat ca. 4.002.682 m<sup>2</sup> Gründachfläche. Bei einer mittleren Verdunstungsleistung von 1,5 kg/m<sup>2</sup>/Tag für bestehenden EGDs, in der Regel unbewässert, wären es ca. 4.082,73 MWh/Tag (4,08 GWh/Tag). In der gesamten Sommerperiode (92 Tage) demnach 383,71 GWh. Für die Stadt München (3.148.043 m<sup>2</sup>) ergibt sich eine Verdampfungsenergie von ca. 2,14 GWh. Bewässerte EGD würden in Berlin zwischen 900 und 1.414 GWh an Verdampfungsenergie in der Sommerperiode erzeugen, für München wären es zwischen 708 und 1.112 GWh (Tab.: 15). Eine sommerliche Bewässerung ist in dieser Dimensionierung nur unter bestimmten Voraussetzungen sinnvoll, ausnahmen wären z. B. zu hohe Grundwasserstände, vorhandenes Zisternenwasser oder die Nutzung von Grauwasser zur Bewässerung (weiterer Forschungsbedarf nötig) von EGDs.

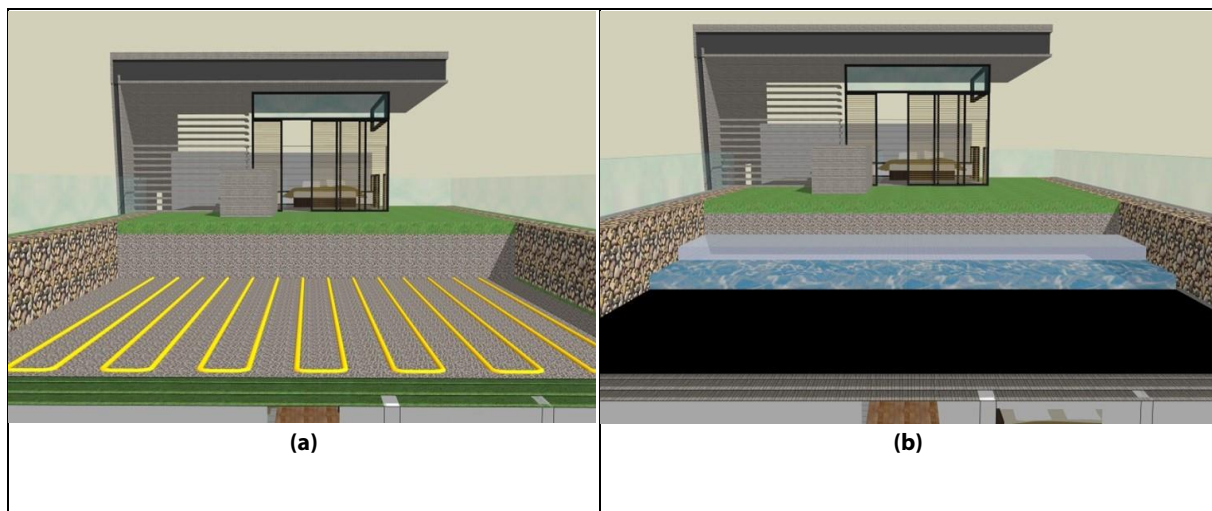


Tab. 15: Hochrechnung der potentiellen ET auf den städtischen Raum.

Bezeichnung	Evapotranspiration				GD - Berlin (~4.002.682 m <sup>2</sup> )				GD - München (~3.148.043 m <sup>2</sup> )			
	ET (kg/m <sup>2</sup> )	Sommer- periode (92 Tage/m <sup>2</sup> )	100m <sup>2</sup> EGD in Liter	100m <sup>2</sup> EGD in m <sup>3</sup>	Tag in m <sup>3</sup>	Sommer- periode (m <sup>3</sup> , 92 Tage)	gWh Tag	Sommer- periode (GWh, 92 Tage)	Tag in m <sup>3</sup>	Sommer- periode (m <sup>3</sup> , 92 Tage)	gWh Tag	Sommer- periode (GWh, 92 Tage)
<b>Kiesdach bewässert</b>	1,56	146,64	14.664,00	14,66	6.244,18	586.953,29	4,25	399,13	4.910,95	461.629,03	3,34	313,91
<b>EGR_16cm bewässert</b>	3,52	330,88	33.088,00	33,09	14.089,44	1.324.407,42	9,58	900,60	11.081,11	1.041.624,47	7,54	708,3
<b>EGR_8,5cm bewässert</b>	4,07	382,58	38.258,00	38,26	16.290,92	1.531.346,08	11,08	1.041,32	12.812,54	1.204.378,29	8,71	818,98
<b>EGR_12,5cm bewässert</b>	4,02	377,88	37.788,00	37,79	16.090,78	1.512.533,47	10,94	1.028,52	12.655,13	1.189.582,49	8,61	808,92
<b>Ret_EGR_20,5cm bewässert</b>	4,31	405,14	40.514,00	40,51	17.251,56	1.621.646,59	11,73	1.102,72	13.568,07	1.275.398,14	9,23	867,27
<b>EGR_16cm bewässert</b>	4,60	432,40	43.240,00	43,24	18.412,34	1.730.759,70	12,52	1.176,92	14.481,00	1.361.213,79	9,85	925,63
<b>EGR_16cm bewässert</b>	4,80	451,20	45.120,00	45,12	19.212,87	1.806.010,12	13,06	1.228,09	15.110,61	1.420.397,00	10,28	965,87
<b>Ret_EGR_20,5 cm 3,5cmAnstau bewässert</b>	5,53	519,82	51.982,00	51,98	22.134,83	2.080.674,16	15,05	1.414,86	17.408,68	1.636.415,71	11,84	1.112,76
<b>EGR_16cm unbewässert</b>	2,00	188,00	18.800,00	18,80	8.005,36	752.504,22	5,44	511,70	6.296,09	591.832,08	4,28	402,45

## 9 Mögliche Einbindung in die Haustechnik

In Zeiten hoher Außenlufttemperaturen kann der hygienisch erforderliche Luftwechsel im Innenraum nur durch die Zufuhr von warmer Außenluft gedeckt werden. In Verbindung mit den solaren Einträgen in den Innenraum und den internen Wärmelasten (durch den Nutzer) führt dies zu einem Anstieg der Raumtemperaturen. Bei Räumen mit einer geringen thermischen Speichermasse (üblich für Dachgeschossausbauten) oder länger anhaltenden Hitzeperioden (Aufheizung der Gebäudehülle) kann dies zu hohen Innenraumtemperaturen führen, die vom Nutzer als unbehaglich empfunden werden und eine verminderte Leistungsfähigkeit bedingen. Konventionell kann eine sommerliche Konditionierung durch den Einsatz von Kompressionskältemaschinen stattfinden, mit Nutzung von nicht regenerativen Ressourcen mit einer hohen Abwärme und einer zusätzlichen Hitzebelastung für den urbanen (Außen-) Raum. Zunehmend wird zur sommerlichen Kühlung ebenfalls das Erdreich in Verbindung mit einer Geothermie genutzt. Damit kann eine unterstützende Kühlung der Innenräume erreicht werden mit der Temperaturspitzen, die vom Nutzer als unbehaglich empfunden werden, gedämpft werden. Im urbanen Raum ist die Nutzung des Erdreiches kaum, insbesondere bei einer verdichteten Bebauung bzw. Bestandsbauten, umsetzbar.



**Abb. 55** (a/b): Nutzung der thermischen Speichermasse zur Klimatisierung von Bauwerken.  
(a): Nutzung von Erdkollektoren. (b): Nutzung der vorgekühlten Luft, zwischen Retentionselementen und Substrataufbau.

Intensiv begrünte Dächer weisen im Vergleich zu extensiven Gründächern eine größere Substratdicke auf. In Verbindung mit einer permanenten Bewässerung des Substrates ist davon auszugehen, dass sich zum einen die thermische Speichermasse des Daches aufgrund der höheren spezifischen Wärmekapazität erhöht und eine weitere günstige Phasenverschiebung gegenüber der Außenlufttemperatur auftritt (Abb. 55 a/b). Durch die Verdunstungsleistung der äußeren Vegetationsebene ist eine zusätzliche Kühlung des Substrates, aufgrund der Bewässerung, auch in Trockenperioden zu erwarten. Dies sind Voraussetzungen, die diesen Dachaufbau besonders im urbanen Raum interessant für die sommerliche Konditionierung von Innenräumen erscheinen lässt.

Bedeutung für Innenräume: Aus energetischer Sicht kann das Gesamtsystem der intensiven, in Teilen auch der extensiven, Dachbegrünung als regeneratives Kühlreservoir (analog Erdreich) begriffen werden, auf das in Zeiten einer hohen Außenlufttemperatur bzw. hohem außenliegenden Strahlungsangebot zurückgegriffen werden kann. Das ist besonders interessant für die sommerliche Konditionierung von natürlich belüfteten Innenräumen, in denen nur mit dem Temperaturniveau des Außenklimas gelüftet werden kann. Aus diesem Grund erscheint die Nutzung des Dachaufbaus als natürliche Ressource naheliegend. Die Neuheit des Lösungsansatzes besteht in der Anwendung von technisch erprobten Verfahren, die sich bereits bei der

Nutzung von Erdwärme/-kälte bewährt haben, wie der Verwendung von Erdkollektoren zur Gebäudeklimatisierung (Abb. 56).

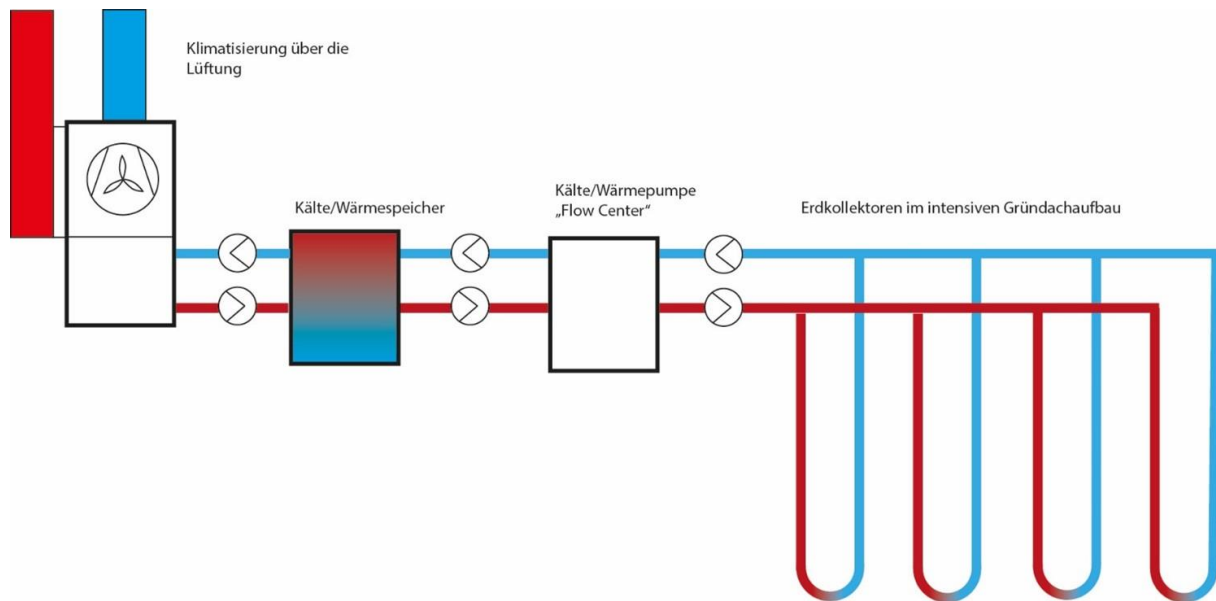


Abb. 56: Schematische Darstellung zur Nutzung von Erdkollektoren mit intensiven Gründachaufbauten.

## 10 Pflege und Wartung von bewässerten extensiven Gründächern

Die Bewässerung extensiver Gründächer bedingt eine Zunahme von wild ausgesäter Biomasse. Bei falscher Pflege wird diese die konventionelle Begrünung mit hitze- und trockenheitsresistenten Pflanzen über die Zeit ablösen. Die Pflegegänge (min. 2 x im Jahr) müssen dringend eingehalten werden. Gehölze und Pflanzen mit starkem Rhizomenwachstum müssen entfernt werden. Je nach Aufwuchs kann eine jährliche Mahd erforderlich werden. Lastaufnahme und der Wurzelschutz sind bei nachträglichem Einbau einer Bewässerung zu berücksichtigen. Soll der Pflegeaufwand weiterhin geringgehalten werden, sollte eine zusätzliche Bewässerung über Tropfschläuche nur in Hitze- und Trockenperioden eingesetzt werden. Eine Trockenphase im Sommer kann jedoch auch zur Förderung der hitze- und trockenheitsresistenten Pflanzen durch Abschalten der Bewässerung genutzt werden. Der Einbau von Retentionsköpern mit kapillarem Aufstieg und Wasseranstau kann die tägliche Verdunstungsleistung über einen langen Zeitraum auf einem hohen Niveau halten und mögliche Trockenphasen besser überbrücken. Nachträglich ist diese Variante nicht mehr zu verbauen, hier muss auf eine aktive Bewässerung mittels Tropfschlauch oder ähnliches zurückgegriffen werden, wenn eine dauerhaft hohe  $ET_a$  angestrebt wird.

Besonderes Augenmerk sollte dabei auf die Vegetation gelegt werden, da diese eine wichtige Rolle spielt. Durch die Bewässerung können Pflanzen mit einem höheren  $ET_a$  dominieren und bilden dabei mehr und höhere Biomasse auf den Dachflächen (Tab. 16). Nach zwei Jahren zusätzlicher Bewässerung dominierten vor allem Wicken (*Vicia* sp.) und Gräser (*Poaceae*) die Versuchsfelder der ufaFabrik Berlin.

**Tab. 16: Vergleich von Pflanzenhöhe und Vegetationsmasse von einem konventionellen Gründach und einem bewässerten Gründach für je 1 m<sup>2</sup>. Die Bewässerung für das Gründach betrug über einen Zeitraum von zwei Vegetationsperioden (2017-2018) 5 l/m<sup>2</sup>/Tag.**

Jahr	EGD (ohne Bewässerung)				EGD (mit Bewässerung)			
	Vegetation (g/m <sup>2</sup> )	Trockenmasse (g/m <sup>2</sup> )	Trockenmasse (%)	Ø Pflanzenhöhe (cm)	Vegetation (g/m <sup>2</sup> )	Trockenmasse (g/m <sup>2</sup> )	Trockenmasse (%)	Ø Pflanzenhöhe (cm)
2017	1019	267	26,2	20,20	955	406	42,5	60,00
2018	994	204	20,5	20,20	1028	387	37,6	80,00

## 11 Kosten und Nutzen

Eigentümer und die Stadt selbst profitieren von Dachbegrünungen. Baulicher Schutz, Freiraumqualität und die ökologischen Vorteile sprechen für sich. Die regelmäßige Bewässerung von Dachbegrünung ist nur mit gesammeltem Niederschlagswasser mittels Zisterne zielführend. Die Wasserqualität von Niederschlagswasser ist dabei ideal für die Bewässerung. Bei der Verwendung von bituminösen Wurzelschutzbahnen ist auf eine mögliche Herbizidwaschung zu achten. Die Zisterne sollte insgesamt so ausgelegt werden, dass sie nicht nur z. B. für Toilettenspülung, Waschmaschine etc., sondern auch für die Dachbewässerung genutzt wird. Die Kosten (inkl. Montage) für eine Zisterne (inkl. Filter und Hauswasserwerk) liegen bei ca. 700-1.000 €/m<sup>3</sup>. Bei einem EFH fallen so ca. 5.000,00 € an, bei einem Speichervolumen von ca. 6-8 m<sup>3</sup>. Eine pauschale Aussage zu dem Verhältnis von Zisternengröße und Gründachfläche ist nicht möglich. Je nach Standort, Gründachaufbau und Planungsziel kann die benötigte Zisternengröße unterschiedlich ausfallen. Ist das Ziel eine dauerhaft hohe Verdunstungsleistung (3,5-5,5 mm/Tag, je nach Gründachaufbau) über die gesamte Vegetationsperiode (~ 244 Tage, ~ 311 mm Niederschlag für Neubrandenburg), so wird man wahrscheinlich nicht um eine zusätzliche Bewässerung mit Trinkwasser umherkommen. Die Nutzung von Trinkwasser zur Bewässerung von Grünflächen ist jedoch kritisch zu sehen. Die der Zisterne angeschlossene Fläche spielt bei der Zisternendimensionierung eine entscheidende Rolle.

Die zusätzlichen einmaligen Kosten für eine automatisierte Dachbewässerung (Tropfschlauch), bei einer Dachfläche von ca. 100 m<sup>2</sup>, belaufen sich dabei auf ca. 2.023,00 € (Tab. 17).

**Tab. 17: Kostenaufstellung für eine zusätzliche Bewässerung. Die Kosten können je nach Hersteller, Ort etc. variieren. Die Schätzwerte wurden aus dem Gartenbau (Praxis) entnommen.**

Beispielhafte Dachbewässerung für eine 100 m <sup>2</sup> Dachbegrünung, Wasseranschluss vorhanden.	Preis netto in €	Preis brutto in €	€ pro m <sup>2</sup>
Steuergerät	180,00	214,20	2,14
Edelstahlventilbox	550,00	654,50	6,54
2 x Magnetventil, Verteiler und Filter	350,00	416,50	4,16
Regensensor	40,00	47,60	0,47
Tropfrohr, 17 mm, 100 m Rolle	80,00	95,20	0,95
Kleinteile (Fittings, Absperrventile, Befestigungen)	200,00	238,00	2,38
Montage	300,00	357,00	3,57
<b>Summe (Gesamt)</b>	<b>1.700,00</b>	<b>2.023,00</b>	<b>20,23</b>

Vergrößert sich die Grundfläche, so lassen sich die Kosten nicht linear hochrechnen. Die Kosten pro m<sup>2</sup> nehmen bei einer Zunahme der Gesamtfläche ab, da bei einer Verdopplung der Grundfläche z. B. keine zwei Steuergeräte, Ventilboxen nötig sind.

Die Pflegekosten steigen bei einer zusätzlichen Bewässerung, so sind weitere Arbeiten (z. B.: Mahd, Pflege und Wartung der Tröpfchenbewässerung, ggf. Pflege und Wartung der Wetterstation) auf dem Gründach notwendig. Die laufenden Kosten für die Gründachpflege liegen zwischen 0,40-0,60 €/m<sup>2</sup> (Bitumendach ca. 0,25 €/m<sup>2</sup>). Bei einer zusätzlichen Bewässerung steigen die Gesamtpflegekosten um ca. 2,47 €/m<sup>2</sup> (Tab. 18) auf 2,87 bis 3,07 €/m<sup>2</sup> im Jahr (Stand: 2016).

**Tab. 18: Zusätzliche Arbeitsschritte bei einer 100 m<sup>2</sup> bewässerten Gründachfläche. Die Kosten können je nach Arbeitsaufwand, Stundenlohn und Erreichbarkeit variieren. Schätzwerte wurden aus der Praxis (Gartenbau) entnommen.**

	Geschätzte Arbeitszeit in Minuten	Geschätzte Arbeitszeit in Minuten pro m <sup>2</sup>	Geschätzte Kosten (bei 45,00 €/Stunde)	Geschätzte Kosten €/m <sup>2</sup>
Inbetriebnahme im Frühsommer (Spülung der Tropfschläuche, Prüfung auf Dichtigkeit)	90	0,9	67,5	0,675
Einmalige Mahd (Abtransport des Schnittgutes, kann bei der Inbetriebnahme im Frühsommer oder bei der Außerbetriebnahme im Spätsommer erfolgen)	180	1,8	135	1,35
Außerbetriebnahme (Wasser abstellen, Tropfschläuche entlüften)	60	0,6	45	0,45
<b>Summe (Gesamt)</b>	<b>6,5</b>	<b>3,3</b>	<b>247,5</b>	<b>2,475</b>

Bei einem EFH lassen sich 30-50 % des Trinkwasserbedarfs durch die Verwendung von Zisternen mit einem Speichervolumen zwischen 6-8 m<sup>3</sup> einsparen. In den Gesamtbaukosten für ein Gebäude sind die Kosten für ein Gründach mit 0,5 % (z. B. Biodiversitätsdach IGA Berlin) zu vernachlässigen (Ansel, 2017). Die Herstellungskosten von Dachbegrünung variieren zwischen 30 und 70 €/m<sup>2</sup> in Hamburg (Freie Hansestadt Hamburg, 2018). Die langfristigen Einsparungen durch den Bau von unbewässerten Gründächern (Schutz der Dachabdichtung, Reduzierung von Niederschlagswasserentgelt, Wertsteigerung der Immobilie, Energieeinsparung) und Zisternen sind nachgewiesen. Die Herstellungs- und Unterhaltskosten für bewässerte Gründächer steigen signifikant (Tab. 17 – 18). Monetäre Vorteile sind durch bewässerte Gründächer nicht zu erwarten.



## 12 Zusammenfassung

Im Mittelpunkt dieses Forschungsvorhabens standen bewässerte, extensive Gründächer (EGD) und deren Auswirkung auf Gebäude und Stadt. Mit verschiedenen Messmethoden (unbewässerte EGDs mit großflächigen Ablaufmessungen, bewässerte EGDs mit wiegenden Kleinlysimetern und Temperaturmessungen) wurden die im Projektantrag genannten Ziele gemessen und ausgewertet. Um die jährliche Verdunstungsleistung von konventionellen Gründachaufbauten zu bemessen, war die Messung über Großvolumenkippen nötig und deren Vergleich zu simulierten Ablaufwerten. Die wichtigsten Schlussfolgerungen, die aus den vorliegenden Ergebnissen gezogen werden können, lauten wie folgt:

### Messungen an den Großvolumenkippen:

- Ältere EGDs (> 10 Jahre) mit einer Substrattiefe von 10 cm können den durchschnittlichen jährlichen Abfluss um bis zu 70 % reduzieren;
- In der Vegetationsperiode können EGDs den Abfluss um bis zu 90 % reduzieren. Die potenzielle ET ( $ET_p$ ) ist höher als die  $ET_a$ ;
- Für die Messung des Abflusses von EGDs muss ein Versuchsfeld von mehr als 50 m<sup>2</sup> errichtet werden;
- Die Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Abflussbeiwerten sind in der Jahresbilanz relativ gering. Die Darstellung von einzelnen Abflussereignissen ist bisher nur über reale Messungen möglich. Auch die täglichen Verdunstungskurven sind bisher bei der Modellierung noch nicht darstellbar.

### Wiegende Kleinlysimeter:

- EGDs mit einer geringeren Substrattiefe benötigen ein kürzeres Bewässerungsintervall, wenn die maximale  $ET_a$  angestrebt ist;
- EGDs mit Rückhaltemodulen, Stau- und Kapillaranstieg können über einen langen Zeitraum eine hohe  $ET_a$  halten;
- Die Messung des Abflusskoeffizienten mit einem kleinen Lysimeter wird nicht empfohlen. Fließwege, Randeffekte, Relief, ggf. Anstau (Blumentopfeffekt) können auf diesen kleinen Versuchsfeldern nicht bemessen werden;
- Ist eine Zisterne vorhanden, ist die Bewässerung von Gründächern mit Niederschlagswasser sinnvoll. Zusätzlich zu der Bewässerung kann durch intelligente Schaltung zusätzlicher Stauraum in der Zisterne geschaffen werden;
- Eine zusätzliche Bewässerung mit Trinkwasser ist nur bedingt zu empfehlen;
- Die Nutzung von Grauwasser (weiterer Forschungsbedarf nötig) wäre als Ansatz denkbar, um einen dauerhaft hohe  $ET_a$  über die Sommerperiode zu generieren.

### Temperaturmessungen:

- In trockenen Sommern können bewässerte EGDs die Temperatur der wasserdichten Membran zwischen Gebäude und Gründach um bis zu 5 K und auf der Vegetationsschicht um bis zu 10 K senken, verglichen mit einem nicht bewässerten Gründach;
- Bewässerte Gründächer weisen eine Temperaturamplitude auf, welche sowohl die Maximal- als auch die Minimaltemperaturen noch weiter ausgleichen.

Die Evapotranspiration kann durch die genannten Maßnahmen gesteigert werden. Daraus lassen sich Empfehlungen für Stadtplanungskonzepte ableiten. Die in dieser Studie durchgeführten Untersuchungen wurden an typischen EGRs durchgeführt. Angesichts der erforderlichen Verbesserungen der grünen Infrastruktur bieten die Dachflächen jedoch Möglichkeiten, die noch nicht voll ausgeschöpft wurden, wie beispielsweise die Sommerkühlung und die Regenwasserbewirtschaftung in Städten mit Platzmangel. Weitere detaillierte Messungen mit bewässerten Lysimetern werden empfohlen, um die Wirkung der Gründächer über einen längeren Zeitraum zu quantifizieren. Zusätzlich sind Temperaturmessungen mit einem Bewässerungssystem mit längeren Messreihen erforderlich. Die Nutzung der thermischen Speichermasse von intensiven Gründächern mit Erdkollektoren und/oder Absaugung der gekühlten Luft steht noch ganz am Anfang der technischen Umsetzung. Auch hier ist weiterer Forschungsbedarf notwendig.

Die Lysimeterversuche dieses Vorhabens gründen auf Erfahrungen mit verschiedenen Bauweisen, die an diesen Standort (HSNB) seit 1999 laufend verbessert wurden. Die Lysimeter konnten direkt mit den Großkippen des realen Dachs verglichen werden, welche im Vorgängerprojekt (Matzinger et al., 2016) untersucht wurden. Im Rahmen dieses Versuchs war es möglich, eine weitere Vergleichsstation in Berlin auf dem Dach des Cafes der ufaFabrik einzubinden und die Kühleffekte des bewässerten Gründachs im ungewöhnlich trockenen Sommer 2018 zu quantifizieren. Um die ETa von Dachbegrünungen weiter zu steigern, bieten sich aktive und passive Maßnahmen auf der Dachfläche an.

#### **Passive Maßnahmen sind:**

- Die Steigerung des substratbedingten Retentionsvolumens, welches durch die passende Wahl des Substrats und des Substrataufbaues wesentlich beeinflusst werden kann;
- Schaffung von Über-, Einstauvolumen bei Starkregen;
- Steigerung der Verdunstungsleistung durch eine gesunde Vegetation;
- Für lange Fließwege sorgen (z. B.: Einleiten des Abflusses von höheren EGDs auf niedrigere EGDs, Kaskadensysteme, Mäandern)

#### **Aktive Maßnahmen sind:**

- Eine zusätzliche automatisierte Bewässerung in Trockenphasen;
- Einbau von Drosseln (auch automatische Drosseln sind möglich);
- Wasseranschluss auf dem Dach schaffen, ggf. manuelle Bewässerung.

## 13 Ausblick

Intensiv begrünte Dächer weisen im Vergleich zu extensiven Gründächern eine größere Substratdicke auf. In Verbindung mit einer permanenten Bewässerung des Substrates ist mutmaßlich die thermische Speichermasse des Daches aufgrund der höheren spezifischen Wärmekapazität zu steigern und eine günstigere Temperaturamplitude gegenüber der Außenlufttemperatur zu erreichen. Durch die Verdunstungsleistung der äußeren Vegetationsebene ist aufgrund der Bewässerung eine zusätzliche Kühlung des Substrates auch in Trockenperioden zu erwarten. Dies sind Voraussetzungen, die diesen Dachaufbau besonders im urbanen Raum interessant für die sommerliche Konditionierung von Innenräumen erscheinen lässt. Dennoch ist weiterer Forschungsbedarf nötig. Bislang gibt es für das Klima im nordeuropäischen Raum keine Langzeituntersuchungen zu den direkten Auswirkungen von bewässerten EGDs auf das Innenraumklima und deren energetischen Einsparpotentialen.

Konventionell kann eine sommerliche Konditionierung durch den Einsatz von Kompressionskältemaschinen stattfinden, mit Nutzung von nicht regenerativen Ressourcen mit einer hohen Abwärme und einer zusätzlichen Hitzebelastung für den urbanen (Außen-) Raum. Zunehmend wird zur sommerlichen Kühlung ebenfalls das Erdreich in Verbindung mit einer Geothermie genutzt. Damit kann eine unterstützende Kühlung der Innenräume erreicht werden. Im urbanen Raum ist die Nutzung des Erdreiches aber kaum umsetzbar, insbesondere bei einer bestehenden verdichteten Bebauung.

Aus den dargelegten Gründen erscheint die Nutzung des Dachaufbaus als natürliche Ressource für die Gebäudekühlung naheliegend. Die Neuheit des Lösungsansatzes besteht in der Anwendung von technisch erprobten Verfahren, die sich bereits bei der Nutzung von Erdwärme/-kälte bewährt haben. Dafür ist es wichtig, verlässliche Kennwerte für die rechnerische Bewertung von verschiedenen Gründachaufbauten zu erhalten, mit denen eine realisierbare „Kühlleistung“ bzw. Wärmeentzugsleistung eingeschätzt werden kann.

## Mitwirkende



Fachvereinigung  
Bauwerksbegrünung e.V.

Bundesverband  
GebäudeGrün e.V. (BuGG)

Nun organisiert im  
Fachverband:

Albrechtstraße 13  
D-10117 Berlin



Bundesverband GebäudeGrün  
e.V. (BuGG)

*finanzielle Unterstützung*



fbr – Bundesverband für Betriebs-  
und Regenwasser e.V. (fbr)

fbr – Bundesverband für  
Betriebs- und Regenwasser e.V.

*finanzielle Unterstützung*

Hilpertstraße 20  
D-64295 Darmstadt



NETAFIM Deutschland GmbH

NETAFIM Deutschland GmbH  
Innovative Bewässerung

*finanzielle Unterstützung*

Im Fuchsloch 7  
D-60437 Frankfurt /  
Nieder-Erlenbach



Netzwerk innovativer  
Unternehmen für Energie- und  
Lärmschutzsanierung

NIELS eG

*finanzielle Unterstützung*

Bissingzeile 11  
D-10785 Berlin



Sieker – Die  
Regenwasserexperten

Ingenieurgesellschaft Prof. Dr.  
Sieker mbH

*finanzielle Unterstützung*

Rennbahnallee 109A  
D-15366 Hoppengarten



Senatsverwaltung für  
Stadtentwicklung, Bauen und  
Wohnen

Senatsverwaltung für  
Stadtentwicklung, Bauen und  
Wohnen

Ministerielle  
Grundsatzangelegenheiten

Fehrbelliner Platz 4  
D-10707 Berlin

Ökologisches Bauen

Ökologische Gebäudekonzepte

*Ideelle Unterstützung*

## Literaturverzeichnis

- Abualfaraj, N.; Cataldo, J.; Elboroloso, Y.; Fagan, D.; Woerdeman, S.; Carson, T.; Montalto, F. (2018): Monitoring and Modeling the Long-Term Rainfall-Runoff Response of the Jacob K. Javits Center Green Roof. In: *Water* 10 (11), S. 1494. DOI: 10.3390/w10111494.
- Andrés-Doménech, I.; Perales-Momparler, S.; Morales-Torres, A.; Escuder-Bueno, I. (2018): Hydrological Performance of Green Roofs at Building and City Scales under Mediterranean Conditions. In: *Sustainability* 10 (9), S. 3105. DOI: 10.3390/su10093105.
- Ansel, W., Zeidler, J., Esch, T., (2015): Fernerkundliche Identifizierung von Vegetationsflächen auf Dächern zur Entwicklung des für die Bereiche des Stadtklimas, der Stadtentwässerung und des Artenschutzes aktivierbaren Flächenpotenzials in den Städten. Abschlussbericht Deutschen Dachgärtner Verbände eV (DDV) und des Deutschen Zentrums für Luft-und Raumfahrt (DLR), gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU, Az 30299), Nürtingen/Oberpfaffenhofen. Auf: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-30299>, zuletzt geprüft am 03.08.2019
- Ansel, W. (2012): Gebäudebegrünung und Stadtplanung. In: *Handbuch Bauwerksbegrünung: „Planung, Konstruktion, Ausführung“*.
- Ansel, W. (2017): Dachbegrünungsmaßnahmen Kosten – Vortrag: Dachbegrünung in Dortmund, online verfügbar unter: [https://www.dortmund.de/media/p/stadtplanungs\\_und\\_bauordnungsamt/-stadtplanung\\_bauordnung\\_downloads/dachbegruenung/Dachbegruenungsmasnahmen.pdf](https://www.dortmund.de/media/p/stadtplanungs_und_bauordnungsamt/-stadtplanung_bauordnung_downloads/dachbegruenung/Dachbegruenungsmasnahmen.pdf), zuletzt geprüft am 05.08.2019.
- Arkar, C.; Domjan, S.; Medved, S. (2018): Heat transfer in a lightweight extensive green roof under water-freezing conditions. In: *Energy and Buildings* 167, S. 187–199. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.02.056.
- Azeñas, V.; Cuxart, J.; Picos, R.; Medrano, H.; Simó, G.; López-Grifol, A.; Gulías, J. (2018): Thermal regulation capacity of a green roof system in the mediterranean region: The effects of vegetation and irrigation level. In: *Energy and Buildings* 164, S. 226–238. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.01.010.
- Baunetz Media GmbH (Hrsg.) (2018): Funktion und Eigenschaften einer Dampfbremse. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/geeignetes-dach/fachwissen/dampfbremse/funktion-und-eigenschaften-der-dampfbremse-158447>, zuletzt geprüft am 10.07.2018.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Naturnaher Umgang mit Regenwasser. Verdunstung und Versickerung statt Ableitung. *UmweltWissen – Wasser*. Augsburg. Online verfügbar unter [https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw\\_88\\_umgang\\_mit\\_regenwasser.pdf](https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_88_umgang_mit_regenwasser.pdf), zuletzt geprüft am 04.03.2019.
- Bevilacqua, P.; Mazzeo, D.; Bruno, R.; Arcuri, N. (2017): Surface temperature analysis of an extensive green roof for the mitigation of urban heat island in southern mediterranean climate. In: *Energy and Buildings* 150, S. 318–327. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.05.081.
- Brandão, C.; Cameira, M.; Valente, F.; Cruz de Carvalho, R.; Paço, T. (2017): Wet season hydrological performance of green roofs using native species under Mediterranean climate. In: *Ecological Engineering* 102, S. 596–611. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.02.025.
- Buttar, N.A.; Yongguang, H.; Shabbir, A.; Lakhiar, I.A.; Ullah, I.; Ali, A. et al. (2018): Estimation of evapotranspiration using Bowen ratio method. In: *IFAC-PapersOnLine* 51 (17), S. 807–810. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.096.
- Cascone, S.; Coma, J.; Gagliano, A.; Pérez, G. (2019): The evapotranspiration process in green roofs: A review. In: *Building and Environment* 147, S. 337–355. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.10.024.
- Chen, Y.; Tong, Z.; Malkawi, A. (2017): Investigating natural ventilation potentials across the globe: Regional and climatic variations. In: *Building and Environment* 122, S. 386–396. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.06.026.

- Cipolla, S.; Altobelli, M.; Maglionico, M. (2018): Decentralized Water Management: Rainwater Harvesting, Greywater Reuse and Green Roofs within the GST4Water Project. In: Proceedings 2 (11), S. 673. DOI: 10.3390/proceedings2110673.
- Cirkel, D., Voortman, B., van Veen, T. and Bartholomeus, R. (2018): Evaporation from (blue-) green roofs: Assessing the benefits of a storage and capillary irrigation system based on measurements and modeling. *Water*, 10(9), p.1253.
- Coenradie, B.; Haag, L.; Streng, B.; Schiffner, S.; Müller, K. (2016): Erhebung und Aufbereitung von Informationen zum Gründachbestand in Berlin. Abschlussbericht. Hg. v. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung.
- De-Ville, S.; Menon, M.; Jia, X.; Stovin, V. (2018): A Longitudinal Microcosm Study on the Effects of Ageing on Potential Green Roof Hydrological Performance. In: *Water* 10 (6), S. 784. DOI: 10.3390/w10060784.
- DiGiovanni-White, K.; Montalto, F.; Gaffin, S. (2018): A comparative analysis of micrometeorological determinants of evapotranspiration rates within a heterogeneous urban environment. In: *Journal of Hydrology* 562, S. 223–243. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.04.067.
- Dobre, C.; Vinke-de Kruijf, J.; Moretto, L.; Ranzato, M. (2018): Stormwater management in transition: The influence of technical and governance attributes in the case of Brussels, Belgium. In: *Environmental Science & Policy* 85, S. 1–10. DOI: 10.1016/j.envsci.2018.03.015.
- Dosch, F.; Haury, S.; Skowski, J.; Wahler, B.; Willinger, S.; Arndt, T. et al. (2015): Grün in der Stadt –Für eine lebenswerte Zukunft. Grünbuch Stadtgrün. 1. Aufl. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin.
- Feng, Y.; Burian, S.; Pardyjak, E. (2018): Observation and Estimation of Evapotranspiration from an Irrigated Green Roof in a Rain-Scarce Environment. In: *Water* 10 (3), S. 262. DOI: 10.3390/w10030262.
- Ferrans, F.; Rey, C.; Pérez, G.; Rodríguez, J.; Díaz-Granados, M. (2018): Effect of Green Roof Configuration and Hydrological Variables on Runoff Water Quantity and Quality. In: *Water* 10 (7), S. 960. DOI: 10.3390/w10070960.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (Hrsg., 2008, 2014, 2018): Dachbegrünungsrichtlinien - Richtlinie für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen. 2018 6. Ausgabe. Bonn.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (Hrsg., 2018): Fassadenbegrünungsrichtlinien – Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen. 3. Ausgabe. Bonn.
- Francis, L.F.M.; Jensen, M. B. (2017): Benefits of green roofs: A systematic review of the evidence for three ecosystem services. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 28, S. 167–176. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.10.015.
- Freie Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie, Hrsg. (2018): Dachbegrünung – Leitfaden zur Planung. Begründungsunterlagen für Dachbegrünungen in der verbindlichen Bauleitplanung sowie in der Baugenehmigungspraxis. Hamburg, unter: [www.hamburg.de/gruendach/10603556/leitfadendachbegrueunung/](http://www.hamburg.de/gruendach/10603556/leitfadendachbegrueunung/), zuletzt geprüft am 25.03.2019.
- Gkatsopoulos, P. (2017): A Methodology for Calculating Cooling from Vegetation Evapotranspiration for Use in Urban Space Microclimate Simulations. In: *Procedia Environmental Sciences* 38, S. 477–484. DOI: 10.1016/j.proenv.2017.03.139.
- Gong, Y.; Yin, D.; Fang, X.; Li, J. (2018): Factors Affecting Runoff Retention Performance of Extensive Green Roofs. In: *Water* 10 (9), S. 1217. DOI: 10.3390/w10091217.
- Grau, A.; Berger, C. (2011): Erkenntnisse und Erfahrungen bei der Anwendung des Arbeitsblatts DWA-A 138 Teil 1: Qualitative Hinweise. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (58).
- Gujer, W. (2007): Siedlungswasserwirtschaft. Mit 84 Tabellen. 3., bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-34330-1>.

- Herath, H.M.P.I.K.; Halwatura, R. U.; Jayasinghe, G. Y. (2018): Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 29, S. 212–222. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.11.013.
- Heusinger, J.; Sailor, D. J.; Weber, S. (2018): Modeling the reduction of urban excess heat by green roofs with respect to different irrigation scenarios. In: *Building and Environment* 131, S. 174–183. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.01.003.
- Hui-Mean, F.; Yusop, Z.; Yusof, F. (2018): Drought analysis and water resource availability using standardised precipitation evapotranspiration index. In: *Atmospheric Research* 201, S. 102–115. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.10.014.
- Drefahl, J. (1995): *Dachbegrünung – Abdichtung, Dichtungsschutz, konstruktiver Aufbau*. 140 Details. Köln.
- Jahanfar, A.; Drake, J.; Sleep, B.; Gharabaghi, B. (2018): A modified FAO evapotranspiration model for refined water budget analysis for Green Roof systems. In: *Ecological Engineering* 119, S. 45–53. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.04.021.
- Johannessen, B. G.; Hanslin, H. M. Martin; Muthanna, T. M. (2017): Green roof performance potential in cold and wet regions. In: *Ecological Engineering* 106, S. 436–447. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.06.011.
- Johannessen, B.; Muthanna, T.; Braskerud, B. (2018): Detention and Retention Behavior of Four Extensive Green Roofs in Three Nordic Climate Zones. In: *Water* 10 (6), S. 671. DOI: 10.3390/w10060671.
- Kaboré, M.; Bozonnet, E.; Salagnac, P.; Abadie, M. (2018): Indexes for passive building design in urban context – indoor and outdoor cooling potentials. In: *Energy and Buildings* 173, S. 315–325. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.05.043.
- Köhler, M. (1993): *Fassaden- und Dachbegrünung*. 34 Tabellen. Stuttgart.
- Köhler, M.; Ansel, WoW.Ifgang (Hrsg.) (2012): *Handbuch Bauwerksbegrünung. Planung - Konstruktion - Ausführung; [Dach, Fassade, Innenraum]; mit 49 Tabellen*. Köln: Müller.
- Köhler, M.; Poll, Ph. H. (2010): Long-term performance of selected old Berlin greenroofs in comparison to younger extensive greenroofs in Berlin. In: *Ecological Engineering* 36 (5), S. 722–729. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2009.12.019.
- Kolb, W. (2016): *Dachbegrünung. Planung, Ausführung, Pflege*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer. Online verfügbar unter [http://www.content-select.com/index.php?id=bib\\_view&ean=9783800107773](http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783800107773).
- Ksiazek-Mikenas, K.; Herrmann, J.; Menke, S. B.; Köhler, M.: If You Build It, Will They Come? Plant and Arthropod Diversity on Urban Green Roofs Over Time. *Green Roofs and Urban Biodiversity*. In: *URBAN NATURALIST, Special Issue No. 1:52–72*. Online verfügbar unter <https://www.eaglehill.us/URNAspecial/pdfs-URNAsp1/14%20U127b%20Ksiazek-Mikenas%2021.pdf>, zuletzt geprüft am 04.03.2019.
- Lee, L. S.H.; Jim, C. Y. (2018): Thermal-cooling performance of subtropical green roof with deep substrate and woodland vegetation. In: *Ecological Engineering* 119, S. 8–18. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.05.014.
- Li, X.; Cao, J.; Xu, P.; Fei, L.; Dong, Q.; Wang, Z. (2018): Green roofs: Effects of plant species used on runoff. In: *Land Degrad Dev* 29 (10), S. 3628–3638. DOI: 10.1002/ldr.3102.
- Maniak, U. (2001): *Wasserwirtschaft. Einführung in die Bewertung wasserwirtschaftlicher Vorhaben*. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-59510-3>.
- Mann, G. (2012): 4.2 Vegetationstechnik. In: *Handbuch Bauwerksbegrünung: „Planung, Konstruktion, Ausführung*.
- Mann, G. (2013): Dach- und Fassadenbegrünung - Gezieltes Regenwassermanagement entlastet die Kanalisation, kühlt und verbessert das Kleinklima. In: *fbr-Schriftenreihe, Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V., Bd. 16*.



- Matzinger, A., Riechel, M., Remy, C., Schwarzmüller, H., Rouault, P., Schmidt, M., Offermann, M., Strehl, C., Nickel, D., Sieker, H., Pallasch, M., Köhler, M., Kaiser, D., Möller, C., Büter, B., Leßmann, D., von Tils, R., Säumel, I., Pille, L., Winkler, A., Bartel, H., Heise, S., Heinzmann, B., Joswig, K., Rehfeld-Klein, M. Reichmann, B. (2017): Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung. KURAS-Leitfaden. ERGEBNISSE DES PROJEKTES KURAS. Berlin. Online verfügbar unter [http://www.kuras-projekt.de/fileadmin/Dokumenten\\_Verwaltung/pdf/20170428\\_Leitfaden\\_Regenwasser\\_full\\_final\\_med\\_res.pdf](http://www.kuras-projekt.de/fileadmin/Dokumenten_Verwaltung/pdf/20170428_Leitfaden_Regenwasser_full_final_med_res.pdf), zuletzt geprüft am 25.03.2019.
- Minke, G.; Otto, F.; Gross, R. (2009): Ermittlung des Wärmedämmverhaltens von Gründächern. Aktenzeichen: 24242-25. Kassel. Abschlussbericht.
- Moshari, S.; Heidarinejad, G. (2017): Analytical estimation of pressure drop in indirect evaporative coolers for power reduction. In: *Energy and Buildings* 150, S. 149–162. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.05.080.
- Norton, B.A.; Coutts, A.M.; Livesley, S.J.; Harris, R.J.; Hunter, A.M.; Williams, N.S.G. (2015): Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. In: *Landscape and Urban Planning* 134, S. 127–138. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.10.018.
- Olivieri, F.; Grifoni, R. Cocci; Redondas, D.; Sánchez-Reséndiz, J. A.; Tascini, S. (2017): An experimental method to quantitatively analyse the effect of thermal insulation thickness on the summer performance of a vertical green wall. In: *Energy and Buildings* 150, S. 132–148. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.05.068.
- Palla, A.; Gnecco, I.; La Barbera, P. (2018): Assessing the Hydrologic Performance of a Green Roof Retrofitting Scenario for a Small Urban Catchment. In: *Water* 10 (8), S. 1052. DOI: 10.3390/w10081052.
- Pęczkowski, G.; Kowalczyk, T.; Szawernoga, K.; Orzepowski, W.; Ęmuda, R.; Pokładek, R. (2018): Hydrological Performance and Runoff Water Quality of Experimental Green Roofs. In: *Water* 10 (9), S. 1185. DOI: 10.3390/w10091185.
- Pfoser, N.; Jenner, N.; Henrich, J.; Heusinger, J.; Weber, S. (2014): Gebäude Begrünung Energie. Potenziale und Wechselwirkungen. 1. Ausg. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (FLL-Schriftenreihe Forschungsvorhaben, 2014,01).
- Pille, L.; Säumel, I. (2016): Effekte auf die Biodiversität. Berlin, 2016. Online verfügbar unter [http://www.kuras-projekt.de/fileadmin/Dokumenten\\_Verwaltung/doc/Pille\\_Poster\\_Stakeholder\\_Biodiv.pdf](http://www.kuras-projekt.de/fileadmin/Dokumenten_Verwaltung/doc/Pille_Poster_Stakeholder_Biodiv.pdf), zuletzt geprüft am 20.12.2019.
- Piro, P.; Carbone, M.; de Simone, M.; Maiolo, M.; Bevilacqua, P.; Arcuri, N. (2018): Energy and Hydraulic Performance of a Vegetated Roof in Sub-Mediterranean Climate. In: *Sustainability* 10 (10), S. 3473. DOI: 10.3390/su10103473.
- Ran, J.; Tang, M. (2018): Passive cooling of the green roofs combined with night-time ventilation and walls insulation in hot and humid regions. In: *Sustainable Cities and Society* 38, S. 466–475. DOI: 10.1016/j.scs.2018.01.027.
- Renouf, M.A.; Kenway, S.J.; Lam, K.L.; Weber, T.; Roux, E.; Serrao-Neumann, S. et al. (2018): Understanding urban water performance at the city-region scale using an urban water metabolism evaluation framework. In: *Water research* 137, S. 395–406. DOI: 10.1016/j.watres.2018.01.070.
- Saaroni, H.; Amorim, J. H.; Hiemstra, J. A.; Pearlmutter, D. (2018): Urban Green Infrastructure as a tool for urban heat mitigation: Survey of research methodologies and findings across different climatic regions. In: *Urban Climate* 24, S. 94–110. DOI: 10.1016/j.uclim.2018.02.001.
- Sandoval, V.; Suárez, F.; Vera, S.; Pinto, C.; Victorero, F.; Bonilla, C. et al. (2015): Impact of the Properties of a Green Roof Substrate on its Hydraulic and Thermal Behavior. In: *Energy Procedia* 78, S. 1177–1182. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.097.
- Schafaczek, B.; Zirkelbach, D. (2013): Ermittlung von Materialeigenschaften und effektiven Übergangsparametern von Dachbegrünungen zur zuverlässigen Simulation der hygrothermischen

Verhältnisse in und unter Gründächern bei beliebigen Nutzungen und unterschiedlichen Standorten. Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.18 / II 3-F20-10-1-100. Holzkirchen. Forschungsbericht.

Shao, B.; Du, X.; Ren, Q. (2018): Numerical Investigation of Energy Saving Characteristic in Building Roof Coupled with PCM Using Lattice Boltzmann Method with Economic Analysis. In: *Applied Sciences* 8 (10), S. 1739. DOI: 10.3390/app8101739.

Sieker, F.; Kaiser, M.; Sieker, H. (2006): Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung im privaten, gewerblichen und kommunalen Bereich. Grundlagen und Ausführungsbeispiele. Unter Mitarbeit von Frank Panning und Harald Sommer. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Simon, H.; Lindén, J.; Hoffmann, D.; Braun, P.; Bruse, M.; Esper, J. (2018): Modeling transpiration and leaf temperature of urban trees – A case study evaluating the microclimate model ENVI-met against measurement data. In: *Landscape and Urban Planning* 174, S. 33–40. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2018.03.003.

Stadt Dortmund (2014): Dachbegrünung im Revier. Strategie- und Umsetzungspapier der Emscherkommunen.

Straatmann, Z.; Stevens, G.; Vories, E.; Guinan, P.; Travlos, J.; Rhine, M. (2018): Measuring short-crop reference evapotranspiration in a humid region using electronic atmometers. In: *Agricultural Water Management* 195, S. 180–186. DOI: 10.1016/j.agwat.2017.10.007.

Taleghani, M. (2018): The impact of increasing urban surface albedo on outdoor summer thermal comfort within a university campus. In: *Urban Climate* 24, S. 175–184. DOI: 10.1016/j.uclim.2018.03.001.

Tan, C.L.; Tan, P.Y.; Wong, N.H.; Takasuna, H.; Kudo, T.; Takemasa, Y. et al. (2017): Impact of soil and water retention characteristics on green roof thermal performance. In: *Energy and Buildings* 152, S. 830–842. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.01.011.

Schiemann, T.: Die Hängenden Gärten der Semiramis in Babylon. Pöcking. Online verfügbar unter <http://www.weltwunder-online.de/antike/gaerten-semiramis-babylon.htm>, zuletzt geprüft am 21.10.2019.

Vali, N (2011): Analyse des Dachbegrünungspotentials Wiens. Hg. v. MA 22, Bereich Räumliche Entwicklung.

van Mechelen, C.; Dutoit, T.; Hermy, M. (2015): Adapting green roof irrigation practices for a sustainable future: A review. In: *Sustainable Cities and Society* 19, S. 74–90. DOI: 10.1016/j.scs.2015.07.007.

Vera, S.; Pinto, C.; Tabares-Velasco, P.C.; Bustamante, W.; Victorero, F.; Gironás, J.; Bonilla, C.A. (2017): Influence of vegetation, substrate, and thermal insulation of an extensive vegetated roof on the thermal performance of retail stores in semiarid and marine climates. In: *Energy and Buildings* 146, S. 312–321. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.04.037.

Vijayaraghavan, K.; Joshi, U.M. (2014): Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs. In: *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 194, S. 121–129. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.07.021.

Viola, F.; Hellies, M.; Deidda, R. (2017): Retention performance of green roofs in representative climates worldwide. In: *Journal of Hydrology* 553, S. 763–772. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.08.033.

Wong, G.K.L.; Jim, C.Y. (2015): Identifying keystone meteorological factors of green-roof stormwater retention to inform design and planning. In: *Landscape and Urban Planning* 143, S. 173–182. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.07.001.

Xu, G.; Xue, X.; Wang, P.; Yang, Z.; Yuan, W.; Liu, X.; Lou, C. (2018): A lysimeter study for the effects of different canopy sizes on evapotranspiration and crop coefficient of summer maize. In: *Agricultural Water Management* 208, S. 1–6. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.04.040.

Yang, J.; Mohan K.; Devi I.; Pyrgou, A.; Chong, A.; Santamouris, M.; Kolokotsa, D.; Lee, S.E. (2018): Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. In: *Solar Energy* 173, S. 597–609. DOI: 10.1016/j.solener.2018.08.006.

Zeng, C.; Bai, X.; Sun, L.; Zhang, Y.; Yuan, Y. (2017): Optimal parameters of green roofs in representative cities of four climate zones in China: A simulation study. In: *Energy and Buildings* 150, S. 118–131. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.05.079.

Zhang, Q.; Miao, L.; Wang, X.; Liu, D.; Zhu, L.; Zhou, B. et al. (2015): The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. In: *Landscape and Urban Planning* 144, S. 142–150. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.08.017.

Zhang, Z.; Szota, C.; Fletcher, T.D.; Williams, N.S.G.; Farrell, C.(2019): Green roof storage capacity can be more important than evapotranspiration for retention performance. In: *Journal of environmental management* 232, S. 404–412. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.070.

Zhou, D.; Liu, Y.; Hu, S.; Hu, D.; Neto, S; Zhang, Y. (2017): Assessing the hydrological behaviour of large-scale potential green roofs retrofitting scenarios in Beijing. In: *Urban Forestry & Urban Greening*. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.12.01

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Blick über die extensiven Gründächer der Hochschule Neubrandenburg (Haus 2).....	11
Abb. 2:	Versuchsdachfläche der HSNB (Haus 3).....	12
Abb. 3:	Möglichkeiten zur Steigerung der Biodiversität auf Dachflächen.....	22
Abb. 4:	Ehemalige Versuchsdachfläche in Tornesch. Die Vegetation hat fast 15 Jahre keine Pflege erhalten.....	23
Abb. 5:	Niederschlagsrückhalt und Ablaufverzögerung von 2 extensiven Gründach-aufbauten (blau und rot), einem Referenzkiesdach (lila) und dem aufsummierten Niederschlag (blau und grün) am Standort der Hochschule Neubrandenburg.....	27
Abb. 6:	Einordnung der Dezentralen Regenwasserwirtschaft in die Systematik der Wasserwirtschaft nach Maniak, 2001:21 bearbeitet durch Wolff.....	32
Abb. 7:	Aufbau der wiegenden Kleinlysimeter.....	36
Abb. 9:	Cloudbasiertes Monitoringsystem.....	37
Abb. 8:	Dezentrale Messstation, mit eingebauter USV.....	37
Abb. 10:	Integration der wiegenden Lysimeter in ein bestehendes Gründach, Hochschule Neubrandenburg (Haus 3).....	38
Abb. 6:	Die wiegende Lysimeterstation befand sich auf einem Gründach der Hochschule Neubrandenburg. Der Rahmen wurde verwendet, um die Auswirkungen von Wind und Strahlung auf die Versuchsflächen zu minimieren. Legende: (1) Vegetation, (2) Rahmen, (3) Substrat. ....	38
Abb. 12:	Einbau des Filtervlieses.....	39
Abb. 13:	Höhenausrichtung der Wägezellen, damit wird eine einheitliche Vegetationshöhe gewährleistet.....	39
Abb. 14:	Schritt 1: Verarbeitung der Rohdaten (n= 31 Tage).....	42
Abb. 15:	Schritt 2: Entfernung von Tagen mit Niederschlägen und Abläufen. (n= 31 Tage (Tage ohne Niederschlag und Ablauf)).....	42
Abb. 16:	Schritt 3: Darstellung der einzelnen Tagesgänge (Reduzierung der Tagesgänge auf n= 17 Tage (Tage ohne Niederschlag und Ablauf)).....	43
Abb. 17:	Mitteln aller Tagesgänge zu einem mittleren Tagesgang pro Monat.....	43
Abb. 18:	Mittlere tägliche Verdunstungsleistung von extensiven Gründächern, Y-Achse: durchschnittliche tägliche $ET_a$ (mm); X-Achse: Uhrzeit (SS). ....	44
Abb. 19:	Monatliche Verdunstungsleistung pro $m^2$ , Zusammenfassung aller Werte zweier Messjahre.....	45
Abb. 20:	Übersicht zu den 4 Versuchsdachflächen (Die Großvolumenkippen befinden sich unterhalb der Abläufe.) auf Haus 2 und 3 der Hochschule Neubrandenburg. Die Größe der Versuchsfelder variierte von $103,5 m^2$ (Kiesdach) bis $206,16 m^2$ (extensives Gründach) (Tab. 10). ....	46
Abb. 21:	Schematischer Aufbau der Referenzfläche Kies auf Haus 2, Bildquelle: Schnitt des Dachaufbaus vom Bauplan, bearbeitet von Autoren.....	47
Abb. 22:	Aufsicht der Referenzfläche Kies auf Haus 2. ....	48
Abb. 23:	Schematischer Aufbau des Gründachs auf Haus 2, Bildquelle: Schnitt des Dachaufbaus vom Bauplan, bearbeitet von Wolff.....	48

Abb. 24: Gezeichnete Aufsicht Haus 2 mit der Versuchsfläche KFZ.....	49
Abb. 25: Schematischer Aufbau des Gründachs auf Haus 3, Bildquelle: Schnitt des Dachaufbaus vom Bauplan, bearbeitet von Wolff.....	50
Abb. 26: Aufsicht Haus 3 mit den Versuchsflächen KFO und KFU.....	50
Abb. 27: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Großvolumenkippe.....	51
Abb. 28: Kalibrierung der Großvolumenkippen.....	52
Abb. 29: 2014, Jahresniederschlag und Rückhalt von ext. Gründachaufbauten und einem Referenzkiesdach, gemessen und kalibriert an Großvolumenkippen (aufsummiert).....	53
Abb. 30: 2015, Jahresniederschlag und Rückhalt von ext. Gründachaufbauten und einem Referenzkiesdach, gemessen und kalibriert an Großvolumenkippen (aufsummiert).....	53
Abb. 31: 2016, Jahresniederschlag und Rückhalt von ext. Gründachaufbauten und einem Referenzkiesdach, gemessen und kalibriert an Großvolumenkippen (aufsummiert).....	54
Abb. 32: 2017, Jahresniederschlag und Rückhalt von ext. Gründachaufbauten und einem Referenzkiesdach, gemessen und kalibriert an Großvolumenkippen (aufsummiert).....	54
Abb. 33: Abflussverhalten der Versuchsgründächer in der Vegetationsperiode (blauer Rahmen).....	55
Abb. 34: Grafische Übertragung der Versuchsdachflächen (hier: KFZ) in STROM.XXL.....	56
Abb. 35: Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Ablaufwerte.....	57
Abb. 36: Aufsummierung des Niederschlages und des Ablaufes (gerechnet und gemessen) für den Zeitraum 2014-2017.....	58
Abb. 37: Aufnahme vom 25.09.2018, im Hintergrund die bewässerte Dachfläche (36 m <sup>2</sup> ), im Vordergrund die unbewässerte Dachfläche auf dem Gelände der ufaFabrik (Café) in Berlin.....	59
Abb. 38: Temperaturmessung vom 06.06. bis zum 16.08.2017. Messung mit LOG32, Datenausfall der Temperatur an der Dachabdichtung (unbewässert) ab dem 26.06.2017.....	60
Abb. 39: Mittlerer Tagesgang (Zeitraum: 06.06.-26.06.2017) von der Temperatur an der Dachabdichtung. Datenausfall der Temperatur an der Dachabdichtung (unbewässert) ab dem 26.06.2017.....	60
Abb. 40: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte an der Referenzmessstelle (DWD) auf dem Tempelhofer Feld in Berlin.....	61
Abb. 41: Gemittelter Tagesgang der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit, Quelle: DWD.....	61
Abb. 42: Vergleich der Oberflächentemperatur von einem unbewässerten und einem bewässerten Gründach.....	62
Abb. 43: Gemittelter Tagesgang der Oberflächentemperatur von einem unbewässerten und einem bewässerten Gründach.....	62
Abb. 44: Reduktion der Oberflächentemperatur und der Reduktion der Temperatur an der Dachabdichtung von bewässerten Gründächern und konventionellen unbewässerten Gründächern, gemessen an der UfaFabrik Berlin.....	63
Abb. 45: Temperaturmessung und deren Reduzierung an der Dachabdichtung und der Vegetationsdecke durch den Einsatz von bewässerten Gründächern.....	63
Abb. 46: Temperaturverlauf an der Vegetationsdecke. Maximale Temperatur am 25.07.2018 an der Wetterstation Tempelhof (ca. 5 km Luftlinie): 32,4 °C, Trockenperiode.....	64

Abb. 47: Temperaturreduzierung durch bewässerte Gründächer in 50 cm Höhe, Reduktion der Temperatur um bis zu 15 K, Maximale Temperatur am 25.07.2018 an der Wetterstation Tempelhof (ca. 5 km Luftlinie): 32,4 °C, Trockenperiode. ....	65
Abb. 48: Wiegende Kleinlysimeter zur Bemessung der $ET_a$ .....	66
Abb. 49: Übersicht über die drei Bewässerungstermine und deren tägliche Verdunstungsleistung. ....	67
Abb. 50: $ET_a$ nach der ersten Bewässerung mit 37,5 l/m <sup>2</sup> .....	71
Abb. 51: $ET_a$ nach der zweiten Bewässerung mit 37,5 l/m <sup>2</sup> . ....	71
Abb. 52: $ET_a$ nach der dritten und letzten Bewässerung. ....	72
Abb. 53 (a – h): Verringerung der täglichen $ET_a$ nach den drei Bewässerungsperioden. ....	74
Abb. 54: Abnahme der täglichen $ET_a$ über 30 Tage bei wenig Niederschlag.....	76
Abb. 55 (a/b): Nutzung der thermischen Speichermasse zur Klimatisierung von Bauwerken. (a): Nutzung von Erdkollektoren. (b): Nutzung der vorgekühlten Luft, zwischen Retentionselementen und Substrataufbau. ....	79
Abb. 56: Schematische Darstellung zur Nutzung von Erdkollektoren mit intensiven Gründachaufbauten....	80

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Begrünte Dachflächen und deren Potentiale in Berlin und München.....	9
Tab. 2:	Simulierte Veränderung der Wasserbilanz zweier Quartiere in Berlin durch Maßnahmen der dezentralen RWB (Matzinger et. al., 2016: 53).....	10
Tab. 3:	Folgender Zeit- und Meilensteinplan wurde in dem Forschungsvorhaben bearbeitet .....	13
Tab. 4:	Vergleich von Gründachanteil und Gründachfläche pro Einwohner .....	15
Tab. 5:	Übersicht zu den möglichen Bewässerungssystemen auf Dachbegrünungen. ....	17
Tab. 6:	Tabellarischer Vergleich von einschichtiger und mehrschichtiger Bauweise nach Mann 2012 aus Köhler (HRSG.) 2012: 60, erweitert durch Autoren.....	30
Tab. 7:	Aufbau der wiegenden Kleinlysimeter, Schichthöhe, Gewicht wassergesättigt, neue Station.....	40
Tab. 8:	Aufbau der wiegenden Kleinlysimeter, Schichthöhe, Gewicht wassergesättigt, .....	41
Tab. 9:	Zuordnung der Versuchsfelder .....	41
Tab. 10:	Tabellarische Übersicht der Versuchsfelder. ....	46
Tab. 11:	Jahresabflusswerte der Versuchsgründächer und dem Referenzkiesdach. Standort: Hochschule Neubrandenburg, Niederschlags: HSNB und Trollenhagen (DWD).....	55
Tab. 12:	Abflussverhalten in der Vegetationsperiode. ....	56
Tab. 13:	Bezeichnung und Aufbau der wiegenden Kleinlysimeter .....	67
Tab. 14:	Abflussmessungen an den wiegenden Kleinlysimetern, der Abfluss wurde mittels Gewichtsverlustes bestimmt. ....	69
Tab. 15:	Hochrechnung der potentiellen ET auf den städtischen Raum. ....	78
Tab. 16:	Vergleich von Pflanzenhöhe und Vegetationsmasse von einem konventionellen Gründach und einem bewässerten Gründach für je 1 m <sup>2</sup> . Die Bewässerung für das Gründach betrug über einen Zeitraum von zwei Vegetationsperioden (2017-2018) 5 l/m <sup>2</sup> /Tag.....	81
Tab. 17:	Kostenaufstellung für eine zusätzliche Bewässerung. Die Kosten können je nach Hersteller, Ort etc. variieren. Die Schätzwerte wurden aus dem Gartenbau (Praxis) entnommen. ....	82
Tab. 18:	Zusätzliche Arbeitsschritte bei einer 100 m <sup>2</sup> bewässerten Gründachfläche. Die Kosten können je nach Arbeitsaufwand, Stundenlohn und Erreichbarkeit variieren. Schätzwerte wurden aus der Praxis (Gartenbau) entnommen.....	83



## Abkürzungsverzeichnis

BuGG	Bundesverband GebäudeGrün e. V.
DWD	Deutscher Wetterdienst
E	Dampfdruck der Luft bei aktueller Feuchte
EFH	Einfamilienhaus
EGD	Extensive Dachbegrünung
ET	Evapotranspiration
ET <sub>a</sub>	reale Evapotranspiration
ET <sub>p</sub>	potentielle Evapotranspiration
EU	Europäische Union
F <sub>x</sub>	Flächenanteil
GW	Grundwasserneubildung
HAD	Hydrologischer Atlas von Deutschland
HSNB	Hochschule Neubrandenburg
K	Kelvin
K <sub>f</sub>	Durchlässigkeitsbeiwert
KFO	Kippe Fallrohr Substrat 1
KFS	Kippe Fallrohr Referenzkiesdach
KFU	Kippe Fallrohr Substrat 2
KFZ	Kippe Fallrohr Substrat 3
kJ	Kilojoule
KURAS	Konzept für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwassersysteme
MJ	Megajoule
N	Niederschlag (allg.)
nFK	nutzbare Feldkapazität
p	Dichte der Luft
Q	Gesamtabfluss
Q <sub>b</sub>	Basisabfluss
Q <sub>o</sub>	Oberflächenabfluss
RF	relative Luftfeuchtigkeit
RG	Globalstrahlung
RL	effektive langwellige Ausstrahlung
R <sub>n</sub>	Strahlungsbilanz
SWMM	Storm Water Management Model
T	Zeit
Temp.	Temperatur
U	relative Luftfeuchte (Tagesmittel)
V	Windgeschwindigkeit
v <sub>1</sub>	Windgeschwindigkeit in 1 m Höhe
v <sub>4</sub>	Windgeschwindigkeit in 4 m Höhe
WGIC	World Green Infrastructure Congress
W	Bodenwassergehalt
ψ	Abflussbeiwert