

Klimafolgenanpassung durch Dachbegrünung

Quantifizierung des Potenzials durch Vergleich

internationaler Studien und

Messungen an Hamburger Beispielen

Vorgelegt im Promotionsausschuss der HafenCity Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Dissertation von Michael Richter

geboren in Mittweida

Erstgutachter und wissenschaftliche Betreuung:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Dickhaut

HafenCity Universität Hamburg

Zweitgutachterin:

Prof. Dr.-Ing. Nicole Pfoser

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen

Hamburg, September 2021

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	V
Veröffentlichungen	VI
Zusammenfassung.....	VII
Abstract	X
Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XIX
Abkürzungsverzeichnis	XXII
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Konstanten	XXIV
1. Klimafolgenanpassung und Gebäudebegrünung	1
1.1 Klimawandel, urbane Wärmeinseln & Stadtentwicklung.....	1
1.2 Gebäudebegrünung & Klimafolgenanpassung.....	3
1.3 Dachbegrünung – Grundlagen und Nutzen	6
1.3.1 Technische Grundlagen	6
1.3.2 Stadtökologische Auswirkungen von Dachbegrünungen.....	9
1.4 Quantifizierung von Klimafolgenanpassungsleistungen in Regelwerken	12
1.4.1 Wasserwirtschaftliche Effekte Dachbegrünungen	12
1.4.2 Stadtklimatische Effekte Dachbegrünungen	19
2. Methodik: Systematischer Review, Meta-Analyse und Gründach-Monitorings.....	20
2.1 Forschungsfragen	20
2.2 Systematischer Review internationaler Forschungsliteratur zu Klimafolgenanpassung durch Dachbegrünung.....	22
2.2.1 Schrittweises Vorgehen im Review-Prozess mittels Datenbanksuche.....	22
2.2.2 Extraktion der Forschungsdaten und Übertragung in die Analyse-Datenbank.....	25
2.3 Durchführung der Meta-Analyse mittels statistischer Verfahren	26

2.3.1	Grundlagen Meta-Analyse.....	27
2.3.2	Statistische Verfahren	28
2.4	Monitoring Gründach	30
2.4.1	Gründach auf dem HCU Gebäude	30
2.4.2	Gründächer RISA Pilotprojekt Am Weißenberge	34
2.4.3	Hydrologische Messsysteme	36
2.4.3.1	Messsysteme HCU Gebäude	36
2.4.3.2	Messsysteme RISA Pilotprojekt Am Weißenberge.....	38
2.4.4	Datenaufbereitung und -auswertung.....	40
2.5	Diagnostische Gleichung	41
3.	Quantifizierung der Klimafolgenanpassungsleistungen von Dachbegrünungen	44
3.1	Internationale Forschung zu klimafolgenanpassungs-relevanten Effekten von Dachbegrünungen	47
3.2	Klimafolgenanpassungsleistungen Dachbegrünung.....	53
3.2.1	Hydrologische Effekte Dachbegrünung und beeinflussende Faktoren.....	53
3.2.2	Stadtklimatische Effekte Dachbegrünung und beeinflussende Parameter	59
3.2.3	Auswertung Meta-Analyse	63
3.2.4	Hydrologische Effekte Dachbegrünung und beeinflussende Faktoren.....	64
3.2.4.1	Untersuchungsdesign der Studien zur Regenwasserbewirtschaftung mit Dachbegrünungen	64
3.2.4.2	Langfristiger Regenwasserrückhalt auf Dachbegrünungen	69
3.2.4.3	Regenwasserrückhalt von Einzel-Regenereignissen auf Dachbegrünungen.....	74
3.2.5	Stadtklimatische Effekte Dachbegrünung und beeinflussende Faktoren	86
3.2.5.1	Untersuchungsdesign der Studien zur Beeinflussung stadtklimatischer Effekte durch Dachbegrünungen	86
3.2.5.2	Änderung der durchschnittlichen Lufttemperatur.....	88
3.2.5.3	Änderung der maximalen Lufttemperatur.....	93
3.3	Auswertung der Niederschlags-Abflussmessungen an Gründächern in Hamburg	99
3.3.1	Beschreibung und Analyse der hydrologischen und klimatischen Daten im Untersuchungszeitraum	99

3.3.1.1	Langfristige Entwicklungen hydrologischer Kennwerte und generelle Klimatische Verhältnisse in den Jahren 2015 – 2020 am HCU Gründach.....	99
3.3.1.2	Auswertung von einzelnen Niederschlagsereignissen am HCU Gründach	103
3.3.1.3	Langfristige hydrologische Kennwerte in den Jahren 2017 – 2021 der Retentionsgründächer des RISA Pilotprojekts Am Weißenberge	110
3.3.1.3	Auswertung von einzelnen Niederschlagsereignissen an Retentionsgründächern des RISA Pilotprojekts Am Weißenberge	112
3.3.2	Erstellung Vorhersagemodell – diagnostische Gleichung	116
3.3.2.1	Diagnostische Gleichung Meta-Analyse	117
3.3.2.2	Diagnostische Gleichung Messwerte HCU-Dach	118
4.	Regelwerke: Vergleich - Empfehlungen	123
4.1	Berechnung Gesamtabfluss von Dachbegrünungen.....	124
4.2	Berechnung Überflutungsnachweis nach DIN 1986-100	128
5.	Reflexion der Klimafolgenanpassungspotenziale und Empfehlungen	131
5.1	Potenziale und deren Anwendung in der Praxis - Beantwortung der Forschungsfragen.	131
5.1.1	Quantifizierung von Klimafolgenanpassungsleistungen	131
5.1.2	Abhängigkeiten zwischen Anpassungsleistungen und Rahmenbedingungen - Vorhersagemodell	136
5.1.3	Regelwerke: Vergleich – Empfehlungen.....	137
5.2	Methodenkritik Systematischer Review und Meta-Analyse.....	139
5.3	Ausblick und Forschungsbedarf	140
6.	Literatur	143
7.	Anhang	160
7.1	Literaturliste Quantifizierung der Klimafolgenanpassungsleitungen	160
7.2	Tabellenanhang	172
7.3	Digitaler Anhang.....	175

Danksagung

Einer ganzen Reihe Personen gilt mein Dank an dieser Stelle, da diese Arbeit ohne sie wohl nicht entstanden bzw. fertiggestellt worden wäre.

An erster Stelle gilt mein Dank meinen Betreuenden, Prof. Dr.-Ing. Nicole Pfoser und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Dickhaut. Das langjährige Vertrauen, die stetige Unterstützung und die stets konstruktiven Beiträge von Wolfgang Dickhaut haben die Arbeit entscheidend geprägt. Nicole Pfoser möchte ich besonders für die konstruktiven Diskussionen danken und für die Bereitschaft, mich gerade zum Ende dieser Arbeit noch einmal in eine zielführende Richtung zu lenken.

Mein Dank gilt auch Dr. Sonja Deppisch, die mir meinen thematischen Einstieg ermöglichte und mich über einige Jahre bei unzähligen Kaffees immer wieder motivieren konnte.

Für die nicht endenden Diskussionen über Dachbegrünungen, deren Potenziale und Hamburger Eigenheiten möchte ich auch Dr. Hanna Bornholdt danken.

Und besonderer Dank gilt auch den aktuellen und ehemaligen Kolleg:innen des Fachgebiets Umweltgerechte Stadt- und Infrastrukturplanung. Das stets positive Umfeld, unendliche Hilfsbereitschaft, viele Diskussionen rund um fachliche und nicht-fachliche Themen haben mich stets bestärkt und inspiriert. Obwohl damit ausnahmslos alle gemeint sind, möchte ich Lena Knoop für das Lektorieren und Maya Donelson für die wiederkehrenden motivierenden Gespräche über das „Leben mit einer Dissertation“ danken.

Dank gilt auch meinen Freunden und meiner Familie für die Unterstützung bei den mit dieser Dissertation verbundenen Herausforderungen und der Geduld mit mir.

Veröffentlichungen

Die folgenden Veröffentlichungen entstanden in den vergangenen Jahren im Rahmen unterschiedlicher Forschungsprojekte und sind teilweise als Vorbereitung bzw. thematische Hinführung zu dieser Dissertation entstanden.

Dickhaut W, Richter M (2020) Decentralized Stormwater Management: Experiences with Various Measures in Germany. In Wang, F.; Prominski, M. (Eds.): Water-Related Urbanization and Locality: Protecting, Planning and Designing Urban Water Environments in a Sustainable Way. Singapore: Springer Singapore: 167–179.

Richter M, Dickhaut W (2016) Evaluation of green roof hydrologic performance for rainwater run-off management in Hamburg. Karlsruhe Institute Of Technology, ZEBAU-Centre For Energy, Construction Architecture and the Environment GmbH, Hamburg (Eds.): Sustainable Built Environment Conference 2016 in Hamburg : Strategies, Stakeholders, Success factors, 7th - 11th March 2016 ; Conference Proceedings: Karlsruhe: 536–545.

Richter M, Kruse E, Rodriguez Castillejos Z (2017) Das Gründach als Schwamm und Klimaanlage in der Stadt. Transforming Cities 2 (1): 68–73.

Richter M, Dickhaut W (2019) RISA-Pilotprojekt zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung mit Dachbegrünungen in Hamburg. GebäudeGrün (2): 10–14.

Richter M (2015) Urban climate change-related effects on extreme heat events in Rostock, Germany. Urban Ecosystems (19): 849-866.

Richter M, Dickhaut W (2019) Entwicklung einer Hamburger Gründachstrategie. Wissenschaftliche Begleitung - Wasserwirtschaft & Übertragbarkeit. HafenCity Universität Hamburg. 65 S.

Richter M, Dickhaut W (2021) Langzeituntersuchungen von Retentions Gründächern in Hamburg. GebäudeGrün (3): 7 – 10.

Zusammenfassung

Städte sind besonders gefährdet durch die Auswirkungen des Klimawandels. Durch vermehrte Versiegelung infolge weiterer Urbanisierung und Nachverdichtung verstärken sich die negativen Klimafolgen. Aufgrund hoher Versiegelungsgrade und Bebauungsdichten weisen Städte veränderte wasserhaushaltliche und klimatische Bedingungen gegenüber dem Umland auf. Dadurch sind zukünftig verstärkt Auswirkungen wie Schäden durch Starkregen und Hitzewellen beziehungsweise Trockenperioden zu erwarten. Bereits heutzutage kann Hitzestress ein lebensbedrohliches Problem in europäischen Städten sein und durch die stetig steigende Anzahl der in Städten lebenden Menschen werden zukünftig auch immer mehr Menschen dem Risiko von Hitzestress und weiteren Klimawandelfolgen ausgesetzt sein. Der urbane Wasserhaushalt ist gekennzeichnet durch starke Versiegelung und demzufolge schnelleren Regenwasserabflüssen von Flächen wie Dächern und Straßen direkt in die Kanalisation, geringere Verdunstung aufgrund fehlender Vegetation und geringere Versickerung und somit gestörter Grundwasserneubildung. Bei Starkregenereignissen kommt es häufig zur Überlastung von Kanalisationen und somit zu oberflächlichen Überflutungen innerstädtischer Flächen mit teilweise erheblichen Schäden. Mit dem fortschreitenden Klimawandel kann es zu einer Erhöhung der sommerlichen Starkregenintensitäten und damit häufigerer Überlastung von Kanalisationen kommen, was wiederum zu wirtschaftlichen und gesundheitlichen Schäden führen kann.

Um den genannten zukünftigen Herausforderungen der Stadtentwicklung zu entgegnen, haben in den letzten Jahren urbane Grünflächen an Bedeutung gewonnen. Da heutzutage in Städten kaum noch Raum zur Schaffung „klassischer“ Grünanlagen wie Parks besteht, bieten vor allem grüne Infrastrukturen wie Dachbegrünungen zukünftiges Umsetzungspotenzial. Positive Wirkungen begrünter Dächer wie die Reduzierung von Heiz- und Kühlungskosten und die Reduzierung der urbanen Wärmeinsel, Speicherung von Regenwasser, Lärmreduktion, Filterung von Luftschadstoffen und die Erhöhung der urbanen Biodiversität sind seit einigen Jahrzehnten bekannt. Im Kontext der Klimafolgenanpassung urbaner Gebiete sind insbesondere die Aspekte der Verringerung des städtischen Wärmeinseleffektes und der Verminderung des Risikos urbaner Sturzfluten von Bedeutung bzw. in den vergangenen Jahren weltweit intensiv beforscht worden. Trotzdem ist es derzeit noch schwer, die tatsächlichen quantitativen Wirkungen abzuschätzen. Häufig ist nicht klar, inwiefern die Ergebnisse bestimmter Studien übertragbar sind auf andere spezifische Konditionen und räumliche Aspekte.

Die Ziele dieser Dissertation war es, die Leistungen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels bezüglich Verminderung der urbanen Hitzeinsel und Verringerung des Überflutungsrisikos von Dachbegrünungen zu analysieren und für verschiedene urbane Räume zu quantifizieren. Zusätzlich sollten Rahmenbedingungen, welche die Anpassungsleistungen beeinflussen, ermittelt werden und in ein Vorhersagemodell übersetzt werden. Schließlich sollten betreffende Regelwerke analysiert und bewertet werden.

Die Bewertung von Klimafolgenanpassungsleistungen von Dachbegrünungen erfolgte im ersten Teil anhand eines systematischen Reviewverfahrens und der vertieften Untersuchung und statistischen Analyse von insgesamt 123 wissenschaftlichen Studien. Durch Übertragung der Erkenntnisse in eine Datenbank konnten die potenziellen Wirkungen und deren Abhängigkeiten von geographischen Regionen, meteorologischen Vorbedingungen und technischen Konstruktionsdetails quantifiziert werden. Im Weiteren wurden die hydrologischen Wirkungen und deren Abhängigkeiten anhand von mehrjährigen Messreihen Hamburger Gründächer bewertet. Die Erstellung des Vorhersagemodells zur wasserwirtschaftlichen Wirksamkeit von Dachbegrünungen erfolgte mit einem Ansatz der multiplen linearen Regression.

Dachbegrünungen zeigten in jedem Fall einen gewissen Regenwasserrückhalt und Verzögerungen von Abflussbeginn und Abflussspitzen. Im Mittel wurden langfristig von unterschiedlichen Dachbegrünungstypen etwa 40 % in den Wintermonaten bis 73 % in den Sommermonaten zurückgehalten. Für Einzelereignisse wurden Werte von 60 % Regenwasserrückhalt, Spitzenabflussbeiwerte von 0,37 und Verzögerungen von Abflussbeginn bzw. –maximum von 235 bzw. 250 Min. erreicht. Parameter wie die Substratstärke, Vorfeuchte, das Alter des Daches, das Gefälle, die Regenmenge und –intensität, die Jahreszeit bzw. der Breitengrad, Pflanzenarten sowie Substratzusammensetzung können die Wirksamkeit beeinflussen. Die multiple lineare Regression lieferte für die Vorhersagemodelle jedoch hauptsächlich die Regenmenge als abflussbestimmenden Parameter. Durch Dachbegrünungen konnten bezüglich deren stadtklimatischen Potenzials deutliche Reduktionen der Temperaturen in der Umgebung von Gebäuden bzw. in gesamten Stadtteilen nachgewiesen werden. Durchschnittstemperaturen wurden im Mittel um 0,6 °C (max. 1,8 °C) herabgesenkt, die maximalen Abkühlungspotenziale erreichten bis zu 3,8 °C. Dafür waren insbesondere das verfügbare Wasserdargebot und großflächige Umsetzung von Dachbegrünungen entscheidende Parameter.

Der Vergleich von Regelwerken zur hydrologischen Bemessung von Dachbegrünungen zeigte große Spannbreiten in der Wirkungsberechnung. Bei nahezu allen vergleichenden Berechnungen wurden mit

den derzeit in der deutschen Planungspraxis relevanten Verfahren erhöhte Überflutungssicherheiten durch Unterschätzung des Rückhalts von Dachbegrünungen, andererseits mögliche systematische Überdimensionierung nachgelagerter Entwässerungsanlagen aufgezeigt.

Abstract

Cities are particularly at risk from the effects of climate change. Increasing sealing as a result of further urbanization and redensification intensifies the negative climate impacts. Due to high degrees of sealed surfaces and building densities, the water balance and climatic conditions in cities have changed compared to the surrounding countryside. As a result, increased impacts such as damage caused by heavy rainfall and heat waves or dry periods are to be expected in the future. Heat stress can already be a life-threatening problem in European cities today, and due to the steadily increasing number of people living in cities, more and more people will be exposed to the risk of heat stress and other climate change impacts in the future. The urban water balance is characterized by a high degree of sealing and consequently faster rainwater runoff from surfaces such as roofs and streets directly into the sewage system, lower evaporation due to a lack of vegetation and lower infiltration and thus disturbed groundwater recharge. During heavy rainfall events, sewer systems are often overloaded, resulting in flooding of inner-city areas, sometimes causing considerable damage. As climate change progresses, there may be an increase in summertime heavy rainfall intensities and thus more frequent overloading of sewer systems, which in turn may lead to economic and health damage.

In order to meet the aforementioned future challenges of urban development, urban green spaces have gained importance in recent years. Since there is hardly any space left in cities today for the creation of "classic" green spaces such as parks, green infrastructure and in particular green roofs, offer future implementation potential. Positive effects of green roofs such as the reduction of heating and cooling costs and the reduction of the urban heat island effect, storage of rainwater, noise reduction, filtering of air pollutants and the increase of urban biodiversity have been known for several decades. In the context of climate change adaptation of urban areas, reducing the UHI effect and reducing the risk of urban flash floods are have become especially important or have been intensively researched worldwide in past years. Nevertheless, it is currently still difficult to estimate the actual quantitative effects. It is often not clear to what extent the results of certain studies are transferable to other specific conditions and spatial aspects.

The objectives of this dissertation is to analyze and quantify the adaptation performance of green roofs in terms of urban heat island reduction and flood risk reduction for different urban spaces. In addition, framework conditions that influence adaptation performance are identified and translated into a predictive model. Finally, relevant regulations are analyzed and evaluated.

In the first part, an assessment of the climate impact adaptation services of green roofs was carried out by means of a systematic review procedure and an in-depth investigation and statistical analysis of a total of 123 scientific studies. By transferring the findings into a database, the potential effects and their dependencies on geographic regions, meteorological preconditions and technical design details could be quantified. Furthermore, the hydrological effects and their dependencies were evaluated on the basis of several years of measurement data of green roofs in Hamburg. The prediction model for the hydrological effectiveness of green roofs was developed using a multiple linear regression approach.

In each case, green roofs showed a degree of rainwater retention and delays of runoff onset and runoff peaks. On average, over the long term different types of green roofs retained about 40% in the winter months to 73% in the summer months. For individual events, values of 60% stormwater retention, peak runoff coefficients of 0,37 and delays of runoff onset and peak of 235 and 250 min, respectively, were achieved. Parameters such as substrate thickness, pre-moisture, roof age, slope, rainfall amount and intensity, season or latitude, plant species and substrate composition can influence effectiveness. However, the results of the multiple linear regression show mainly rainfall as the runoff determining parameter for the predictive models. Green roofs were shown to significantly reduce temperatures in the vicinity of buildings and in entire city districts with respect to their urban climatic potential. Average temperatures were lowered by 0.6 °C (max. 1.8 °C), the maximum cooling potential reached up to 3.8 °C. This was due in particular to the available water resources. The decisive parameters for this were, in particular, the available water supply and the large-scale implementation of green roofs.

A comparison of regulations for the hydrological design of green roofs showed large ranges in the calculation outcomes of rainwater retention effects. In almost all comparative calculations, the methods currently relevant in German planning practice showed increased flood safety due to underestimation of the retention of green roofs on the one hand, and possible systematic oversizing of downstream drainage systems on the other hand.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Standardisierter Systemaufbau einer Dachbegrünung (Richter und Dickhaut 2019).	7
Abbildung 2: Idealierte Niederschlags- und Abfluss-Ganglinie mit Niederschlags- (P_R) und Abflusspeak (P_Q) und zugehörigen Zeitpunkten (t_r , t_Q).	10
Abbildung 3: Auszug aus dem sog. Stormwater control sheet der Stadt Chicago.mit vorgegebenen Abflussbeiwerten C für best management practices.	15
Abbildung 4: Zur Berechnung der Regenwasser-Abflüsse von verschiedenen Flächen mittels SCS-Verfahren vorgeschlagenen CN-Werte für Philadelphia.	17
Abbildung 5: Mittels SCS-Verfahren ermittelte Summenlinien des Abflusses bzw. effektiven Niederschlags.	18
Abbildung 6: Zusammenfassende Grafik der in der Arbeit genutzten Methoden.....	20
Abbildung 7: Schematischer Ansatz des Vorgehens bei der Datenbanksuche mit multiplen Schlagwörtern und Verknüpfung der PICO Elemente.	24
Abbildung 8: Prozess einer Meta-Analyse.....	28
Abbildung 9: Aufbauskizze des extensiven Gründachs des HCU-Gebäudes.	30
Abbildung 10: Zeitliche Entwicklung des mittleren Pflanzenbedeckungsgrades der Dachbegrünung auf dem HCU Gebäude von März 2015 bis März 2018.	31
Abbildung 11: Fotodokumentation der Transekte im nord-östlichen Bereichs des Gründachs auf dem HCU Gebäude von März 2015 (oben links) bis April 2018 (unten rechts). Die Aufnahmezeitpunkte sind im jeweiligen Teilbild benannt. Es ist zu beachten, dass in einigen Monaten keine Aufnahmen zur Verfügung stehen.....	33
Abbildung 12: Entwicklung der Pflanzenbedeckung am Nordteil des Gründachs im Februar 2015 (Links, Bedeckungsgrad < 20%), März 2016 (mitte, Bedeckungsgrad ~ 70%) und Juni 2017 (Rechts, Bedeckungsgrad ~ 90%).	34
Abbildung 13: Schematische Darstellungen unterschiedlicher Gründachtypen des RISA Pilotprojekts Am Weißenberge.....	35
Abbildung 14: Luftansicht des HCU-Gebäudes mit Dachbegrünung (oben links), schematische Skizze der Zusammenführung der Abflussstränge und zusammenführung in Messsystem im EG (oben rechts), Dachaufsicht HCU-Gebäude mit Standorten der Niederschlagsmesser (rote Punkte) und Einzugsgebiet zur Dachabflussmessung (schattiert).	36
Abbildung 15: Niederschlagssensor mit Datenlogger (oben links), Messbox mit Datenlogger im EG (oben rechts), innerer Aufbau der Messbox mit V-Wehr und Kippzähler (unten).	38

Abbildung 16: Prinzip der Messung von Durchflüssen an einem Thompson-Messwehr.....	38
Abbildung 17: Platzierungsplan der Messboxen zur Abflussmessung (a) auf Haus 1 bis 3 (v.l.n.r.), Messbox an Gebäude 1 mit Kippzählertechnik (b, c) und dualem Messsystem (d) und Regenmesser nach HELLMANN (e).....	39
Abbildung 18: Schematische Darstellung einer Regressionsgerade für fiktive Messwerte von X und Y. Die roten linien stellen den Abstand der gemessenen Werte zur Ausgleichsgeraden dar („Residuen“).	43
Abbildung 19: Schematische Vorgehensweise bei der Auswahl der zur Quantifizierung in die Datenbank übertragenen Studien (WoS = Web of Science, DOAJ = Directory of Open Access Journals).	45
Abbildung 20: Thematische und methodische Aspekte der in die Review-Datenbank übertragenen Studieninhalte. Die Kategorien der thematischen Aspekte sind mit farblichen Hintergründe zur besseren Unterscheidung dargestellt.	46
Abbildung 21: Geographische Verteilung der zur quantitativen Auswertung genutzten Studien, die Größe der Kreise entspricht der Anzahl an Studien pro Land.....	47
Abbildung 22: Geographische Verteilung der zur quantitativen Auswertung genutzten Studien, die Größe der Kreise entspricht der Anzahl an Studien pro Land. Aufteilung der Anzahl der Studien nach Effekttyp. Blau: Dachbegrünung – Regenwasserrückhalt, Rot: Dachbegrünung – UHI-Effekt.	48
Abbildung 23: Anzahl an Studien pro Jahr (Veröffentlichungsdatum).....	48
Abbildung 24: Klimaklassifikation nach Köppen-Geiger.....	50
Abbildung 25: Anzahl an Studien in verschiedenen klimatischen Räumen, klassifiziert nach Köppen- Geiger.	51
Abbildung 26: Linearer Zusammenhang zwischen Anteil der begrünten Dachflächen und dem maximalen Hitzeinseleffekt in 2 m Höhe in der Region Baltimore-Washington.....	62
Abbildung 27: Anzahl der in den Studien untersuchten Gründach-Flächengrößen. Die Größen-Klassen haben aufgrund der besseren Darstellbarkeit unterschiedliche Bereiche bzw. Breiten. Es wird unterschieden zwischen der Anzahl untersuchter unterschiedlicher einzelnen Dächer bzw. deren Aufbautypen (blau) und den Datenpunkten, die mithilfe dieser Dächer erhoben wurden und in die Auswertung einfließen (rot). Zur besseren Übersicht ist die jeweilige Anzahl ist an den Balken vermerkt.....	65
Abbildung 28: Beispielhafte Abbildung eines Gründach-test-plots in Adelaide, Australien.....	65

Abbildung 29: Histogramm mit Häufigkeiten der Substratstärken, bezogen auf die einzelnen Dachbegrünungen in den Studien. Dachbegrünungen mit Substratstärken <150 mm werden als extensiv kategorisiert, mit Substratstärken ab 150 mm als einfach-intensiv bzw. intensiv.	66
Abbildung 30: Histogramm der Häufigkeit der Dachgefälle an untersuchten Dächern (Intervallbreite: 2 %).	67
Abbildung 31: Anzahl der verwendeten Haupt-Vegetationstypen auf den untersuchten Dachbegrünungen, n: keine Angaben.	68
Abbildung 32: Prozentualer Anteil der Dachbegrünungen mit den Vegetationstypen Sedum, Gräser, krautige Pflanzen, Stauden und Gehölze innerhalb der Klimahauptgruppen der Köppen-Geiger Klassifikation. N entspricht der Anzahl der Dächer in den Klimahauptzonen.....	68
Abbildung 33: Regenwasserrückhalt auf Dachbegrünungen in unterschiedlichen Zeiträumen (Winter/Sommer), kategorisiert nach Klimahauptzonen nach der Köppen-Geiger Klimaklassifikation.	69
Abbildung 34: Streudiagramme des Regenwasserrückhalts in % über die gesamten Messzeiträume mit verschiedenen Variablen der technisch-konstruktiven und klimatisch-ökologischen Eigenschaften der Dachbegrünungsstudien. Eingetragen sind jeweils die linearen regressionsgeraden und das Bestimmtheitsmaß R^2 . Die Y-Achse der Diagramme stellt jeweils den Regenwasserrückhalt in % dar. Signifikante bivariate lineare Zusammenhänge sind mit * gekennzeichnet.	71
Abbildung 35: Box-and-whisker plots der unterschiedlichen Drainagetypen bzw. -materialien und deren Regenwasserrückhalte über die Gesamtzeiträume (n = ohne Drainage).	73
Abbildung 36: Histogramm der Regenmengen. Die Häufigkeiten der Regenereignisse in den einzelnen Klassen (Klassengröße = 5mm) ist an der X-Achse abzulesen.	74
Abbildung 37: Box-and-Whisker-plot der Klimahauptzonen nach Köppen-Geiger und deren Regenmengen pro Einzelereignis in der Datenbank.	75
Abbildung 38: Streudiagramme des Regenwasserrückhalts für einzelne regenereignisse mit verschiedenen Variablen der technisch-konstruktiven und klimatisch-ökologischen Eigenschaften der Dachbegrünungsstudien. Eingetragen sind jeweils die linearen regressionsgeraden und das Bestimmtheitsmaß R^2 . Die Y-Achse der Diagramme stellt jeweils den Regenwasserrückhalt in % dar. Signifikante bivariate lineare Zusammenhänge sind mit * gekennzeichnet.	77

Abbildung 39: : Box-and-Whisker-plot der Klimahauptzonen nach Köppen-Geiger und deren prozentualer Regenwasserrückhalt der Dachbegrünungen pro Einzelregenereignis in der Datenbank.	79
Abbildung 40: Box-and-Whisker-plot der Vegetationstypen und deren prozentualer Regenwasserrückhalt der Dachbegrünungen pro Einzelregenereignis in der Datenbank(n = ohne Bewuchs).	80
Abbildung 41: Streudiagramme der Spitzenabflussbeiwerte für einzelne regenereignisse mit verschiedenen Variablen der technisch-konstruktiven und klimatisch-ökologischen Eigenschaften der Dachbegrünungsstudien. Eingetragen sind jeweils die linearen regressionsgeraden und das Bestimmtheitsmaß R^2 . Die Y-Achse der Diagramme stellt jeweils den Spitzenabflussbeiwert dar. Signifikante bivariate lineare Zusammenhänge sind mit * gekennzeichnet.	81
Abbildung 42: Box-and-Whisker-plot der Klimahauptzonen nach Köppen-Geiger und deren Spitzenabflussbeiwerte der Dachbegrünungen pro Einzelregenereignis in der Datenbank.	82
Abbildung 43: Box-and-Whisker-plot der Drainagetypen bzw. -materialien und deren Spitzenabflussbeiwerte der Dachbegrünungen pro Einzelregenereignis in der Datenbank (n = ohne Drainage).	83
Abbildung 44: Box-and-Whisker-plot der Vegetationstypen und deren Spitzenabflussbeiwerte der Dachbegrünungen pro Einzelregenereignis in der Datenbank (n = ohne Bewuchs).....	84
Abbildung 45: Streudiagramme der Verzögerung des Abflussbeginns (a, c) und der Verzögerung des maximalen Abflusses gegenüber der maximalen regenintensität (b, d) für einzelne regenereignisse mit verschiedenen Variablen der technisch-konstruktiven und klimatisch-ökologischen Eigenschaften der Dachbegrünungsstudien. Eingetragen sind jeweils die linearen regressionsgeraden und das Bestimmtheitsmaß R^2 . Signifikante bivariate lineare Zusammenhänge sind mit * gekennzeichnet.....	85
Abbildung 46: Histogramme der Untersuchungsdesigns bezüglich Modellierungen (Modelltyp)/Messungen und der räumlichen Ebene der Untersuchungen.....	86
Abbildung 47: Prozentuale Anteile der in den Studien genutzten Vegetationstypen.	87
Abbildung 48: Dominierende Vegetationstypen in den Klimahauptzonen nach Köppen-Geiger.....	87
Abbildung 49: Streudiagramme der Änderung der durchschnittlichen Lufttemperatur (meist eines Tages) auf Fußgängerniveau in der Umgebung der Dachbegrünungen (bei kleinräumigen Untersuchungen) oder im Durchschnitt über einen größeren Raum (z.B. Stadtteil). Die Y-Achse stellt jeweils die durchschnittliche Temperaturänderung im Gegensatz zum nicht-Begrünungs-	

Szenario dar. Eingetragen sind jeweils die linearen regressionsgeraden und das Bestimmtheitsmaß R^2	89
Abbildung 50: Änderung der Durchschnittstemperaturen durch Dachbegrünungen in den Köppen-Geiger Klimahauptzonen.....	90
Abbildung 51: Box-and-Whisker-plot der Änderungen der Durchschnittstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zur Größe bzw. Skala des Untersuchungsgebietes.	91
Abbildung 52: Box-and-Whisker-plot der Änderungen der Durchschnittstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zur jeweiligen Bebauungstypologie des Untersuchungsgebietes....	92
Abbildung 53: Box-and-Whisker-plot der Änderungen der Durchschnittstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zum Dachbegrünungstyp.	92
Abbildung 54: Streudiagramme der maximalen Änderung der Lufttemperatur auf Fußgängerniveau in der Umgebung der Dachbegrünungen (bei kleinräumigen Untersuchungen) oder über einen größeren Raum (z.B. Stadtteil). Die Y-Achse stellt jeweils maximale Temperaturänderung im Gegensatz zum nicht-Begrünungs-Szenario dar. Eingetragen sind jeweils die linearen regressionsgeraden und das Bestimmtheitsmaß R^2 . Signifikante bivariate lineare Zusammenhänge sind mit * gekennzeichnet.	93
Abbildung 55: Box-and-Whisker-plot der maximalen Änderungen der Umgebungstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zur Klimahauptzone nach Köppen & Geiger.....	95
Abbildung 56: Box-and-Whisker-plot der maximalen Änderungen der Umgebungstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zur räumlichen Skala des Untersuchungsgebiets der Studien.	96
Abbildung 57: Box-and-Whisker-plot der maximalen Änderungen der Umgebungstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zur Bebauungstypologie.	96
Abbildung 58: Box-and-Whisker-plot der maximalen Änderungen der Umgebungstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zum Dachbegrünungstyp.....	98
Abbildung 59; Box-and-Whisker-plot der maximalen Änderungen der Umgebungstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zu Pflanzentypen der Begrünungen.....	99
Abbildung 60: mittlere Monatssummen des Niederschlags (blaue Balken) und Abfluss (schwarze Linie) von 2015-2020, gemessen am Gründach des HCU-Gebäudes.....	101
Abbildung 61: Streudiagramme der Werte der monatlichen Retention von Regenwasser (oben) auf dem HCU-Dach und der Retention einzelner Regenereignisse mit den fortlaufenden Nummern der Regen (unten). Die zugehörigen Trendlinien sind ebenfalls eingetragen.....	102

Abbildung 62: Anteil der gemessenen Datensätze bzw. Regenereignisse pro Regenmengenkategorie von 2015 – 2020 in % der Gesamtregenereignisse (838 = 100%).	104
Abbildung 63: Box-and-Whisker plots der Prozentualen Reduktionswerte der Dachbegrünung auf dem HCU-Dach bezüglich der Gesamt-Regenmenge und der Spitzenabflusses, Kategorisiert nach regenmengen-Kategorien.	105
Abbildung 64: Darstellung aller auf dem Dach der HCU gemessenen Regenereignisse mit Regendauer und Regenmenge (Niederschlagshöhe und der Einordnung als Starkregenereignisse bezüglich der Wiederkehrintervalle für Hamburg nach KOSTRA 2010.	107
Abbildung 65: Regen (blau)- und Abflussganglinien (schwarz) ausgewählter Starkregenereignisse, die Daten sind in Tabelle 19. Die x-Achse beschreibt jeweils die Zeit in Minuten, die Y-Achse die gefallene Regenmenge in mm pro Minute.	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 66: Jahreszeitliche Werte des Regenwasserrückhalts der unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungen (Winter = Dez, Jan, Feb; Frühling = Mär, Apr, Mai; Sommer= Jun, Jul, Aug; Herbst = Sep, Okt, Nov).	112
Abbildung 67: Werte des mittleren Regenwasserrückhalts von einzelnen Regenereignissen für die unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungen, in Abhängigkeit von unterschiedlichen Regenmengen-Kategorien.	113
Abbildung 68: Jahreszeitliche Mittelwerte des Regenwasserrückhalts von einzelnen Regenereignissen der unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungen (Winter = Dez, Jan, Feb; Frühling = Mär, Apr, Mai; Sommer= Jun, Jul, Aug; Herbst = Sep, Okt, Nov).	114
Abbildung 69: Summenkurven der untersuchten Retentionsdachbegrünungen im Vergleich zum Regen und einem Extensivdach am selben Standort von einem 35 mm Regen am 27.08.2019. Die Regendaten der sind stündliche Daten der naheliegenden DWD-Station Fuhlsbüttel.	115
Abbildung 70: Darstellung des Regressionsmodells Nr. 2 (schwarze linie) mit den dazugehörigen Datenpunkten für Regenmenge und Abfluss aus den analysierten Studien.	118
Abbildung 71: Darstellung des Regressionsmodells Nr. 1 (schwarze linie) mit den am HCU-Dach gemessenen Datenpunkten für Regenmenge und Abfluss.	120
Abbildung 72: Vergleich der Regressionsgeraden für die Werte der Meta-Analyse (rot) und vom HCU-Dach (schwarz).	120
Abbildung 73: Histogramm der Häufigkeiten (in %) der Differenzen Δ_Q zwischen Messung am HCU-Dach Q_{HCU} und Regressionsmodell Q_{Modell} . Zusätzlich ist die Normalverteilungskurve dargestellt.	121

Abbildung 74: Monatliche Mittelwerte der Abflussdifferenzen einzelner Regenereignisse zwischen Messwerten und Regressionsmodell.	122
Abbildung 75: Abflussdifferenzen Messung-Modell in verschiedenen Regenmengenkategorien.	122
Abbildung 76: Orthophoto Des HCU Gebäudes mit den Flächen des Einzugsgebietes der Gründach-Abflussmessungen (598 m ² , pink umrandet) und den nicht-begrüntem Bereichen (130 m ² , schwarz umrandet).....	125
Abbildung 77: Balkendiagramm mit Vergleich der mit unterschiedlichen Berechnungsverfahren ermittelten Abflussvolumina (grün) vom Gründach in Abhängigkeit der Regenmenge (blau). Zusätzlich ist die daraus resultierende Retention in % als Linie eingezeichnet. Pro Berechnungsverfahren sind jeweils die 5- und 100-jährlichen Bemessungsregen und zugehörigen Direktabflüsse als Balken dargestellt	127
Abbildung 78: Skizze des für die Berechnung des Überflutungsnachweises angenommenen Grundstücksfläche. Das Gebäude entspricht dem Gebäudeteil des Einzugsgebiets der Abflussmessungen auf dem HCU-Dach (598 m ²), der umgebende graue Bereich stellt die angenommene Rest-Grundstücksfläche [402 m ²] mit Plattenbelag dar.	129
Abbildung 79: Berechnete auf dem Grundstück schadlos zurückzuhaltende Abflussvolumina (grüne Balken) für einzelne Berechnungsverfahren im Vergleich zum Verfahren nach DIN 1986-100. In den weißen Boxen über den Balken sind die dazugehörigen Prozentzahlen angegeben.	130
Abbildung 80: Streudiagramm und zugehörige lineare Anpassungslinie der Datenpunkte aus der Literaturdatenbank bezüglich Regenmengen und zugehörigem regenwasserrückhalt in % auf den Dachbegrünungen mit Substratstärken von 60 – 100 mm der Literaturstudien. Es wurden nur Regen ≥ 30 mm und ≤ 60 Min. aufgenommen.	133

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Dachbegrünungstypen und ihre Eigenschaften.....	6
Tabelle 2: Jahres- und Spitzenabflussbeiwerte für Dachbegrünungen und andere Dachflächen nach FLL.....	13
Tabelle 3: Aus den Studien extrahierte mögliche Parameter.	26
Tabelle 4: Im Rahmen der Meta-Analyse und Auswertung der aufgenommenen Messdaten genutzten statistischen Verfahren und Kennwerte.....	29
Tabelle 5: Pflanzenliste "Sedumteppich".	31
Tabelle 6: Charakteristiken der Klimahaupt- und Untergruppen nach der Koppen-Geiger Klimaklassifikation c mit der Anzahl der in den jeweiligen Gruppen durchgeführten Untersuchungen bzw. Studien zur Klimafolgenanpassungsleistung von Dachbegrünungen. Zur Erklärung der Abkürzungen: T_{ann} = Jahresdurchschnittstemperatur in 2m über N.N.; T_{min} = Monatsmitteltemperatur des kältesten Monats im Jahr; T_{max} = Monatsmitteltemperatur des wärmsten Monats des Jahres; T_{mon} = Monatsmitteltemperatur; P_{ann} = Jahresniederschlagssumme; P_{min} = Niederschlagssumme des trockensten Monats des Jahres; P_{th} = ein trockenheitsgrenzwert in mm, ist abhängig von T_{ann} und der jährlichen Niederschlagsverteilung; P_{smin} = geringste Monatsniederschlagssumme des trockensten Sommermonats; P_{wmin} = geringste Monatsniederschlagssumme des trockensten Wintermonats; P_{wmax} = höchste Monatsniederschlagssumme des feuchtesten Wintermonats.....	51
Tabelle 7: Auszug aus der Datenbank zur Meta-Analyse. Die Daten zur Studie sind nicht vollständig dargestellt.....	63
Tabelle 8: Koeffizienten der multiplen linearen Regressionsanalyse des langfristigen Regenwasserrückhalts mit unterschiedlichen Variablen in SPSS und deren Signifikanz (p-Wert).	72
Tabelle 9: Deskriptive Statistiken unterschiedlicher Faktoren des Regenwasserrückhalts aller in die Datenbank übertragener Regenereignisse.....	76
Tabelle 10: Koeffizienten der multiplen linearen Regressionsanalyse des langfristigen Regenwasserrückhalts mit unterschiedlichen Variablen in SPSS und deren Signifikanz (p-Wert).	78
Tabelle 11: Koeffizienten der multiplen linearen Regressionsanalyse des Spitzenabflussbeiwerts mit unterschiedlichen Variablen in SPSS und deren Signifikanz (p-Wert).....	82

Tabelle 12: Maximale Lufttemperaturänderungen durch Dachbegrünungen für verschiedene Bebauungstypologien.....	97
Tabelle 13: Hydrologische und klimatische Kennwerte für einzelne Jahre im Messzeitraum 2015- 2020. in den Jahren 2015, 2018 und 2020 fehlen jeweils Daten für mehrere Monate (Anzahl * entspricht der Anzahl der fehlenden vollen Monate), daher sind die hier aufgeführten Daten in den Fällen nicht auf das Gesamt-Jahr bezogen. Daten zu Temperatur und Globalstrahlung stammen von der Luftmessnetzstation Markmannstraße.....	100
Tabelle 14: Hydrologische und klimatische Kennwerte im Messzeitraum 2015-2020, gemittelt über Monate. Daten zu Temperatur und Globalstrahlung stammen von der Luftmessnetzstation Markmannstraße.....	101
Tabelle 15: Jahreszeitliche Unterschiede in den Mittelwerten der Charakteristiken der Regenereignisse und dem Wasserrückhalt und Mittelwerte über den gesamten Messzeitraum.	104
Tabelle 16: Mittelwerte und Mediane des Rückhalts der Regenmengen und der Spitzenabfluss- Reduktion von verschiedenen Regenmengen-Kategorien auf dem HCU-Dach.....	106
Tabelle 17: Charakteristiken der Regenereignisse der in Abbildung 64 abgebildeten Abflussganglinien. Der Wert Regenmenge -7d bezeichnet die regenmenge, die in Summe in den 7 Tagen vor dem zu betrachtenden Regenereignis gefallen ist.....	107
Tabelle 18: Monatliche Mittelwerte und Mittelwert des Gesamtzeitraums (2017 – 2021) des Regenwasserrückhalts in % der unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungen.....	111
Tabelle 19: Mittelwert, Minimum und Maximum des Regenwasserrückhalts der unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungen, berechnet über alle gemessenen Regenereignisse.....	113
Tabelle 20: Mittelwert der zeitlichen Verzögerung (in min) des Abflusses gegenüber des zugehörigen Regens über den gesamten Messzeitraum und über Sommer (Jun, Jul, Aug) und Winter (Dez, Jan, Feb).....	114
Tabelle 22: Hydrologische Eingangsparameter der vergleichenden Berechnungen.	123
Tabelle 23: Mittelwerte der den Regenwasserrückhalt bestimmende Werte in Abhängigkeit der jeweiligen auf dem HCU-Dach gemessenen Regenmengen der Einzelereignisse unterschiedlicher Regendauer.	132
Tabelle 24: Mittelwerte der den Regenwasserrückhalt bestimmende Werte in Abhängigkeit der jeweiligen Regenmengen, Werte stammen aus der Literaturliteraturdatenbank.....	132

Tabelle 25: Mittelwert und Maximum der Änderung der Durchschnittstemperaturen und
Maximaltemperaturen aus Studien, die die Veränderung der Umgebungstemperaturen im
bodennahen Bereich gemessen oder modelliert haben..... 135

Abkürzungsverzeichnis

ADWP	Antecedent Dry Weather Period (vorangegangene Trockenwetterperiode)
ANOVA	Analysis of Variance (Einfaktorielle Varianzanalyse)
BfN	Bundesamt für Naturschutz
CN	Runoff Curve Number
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
DWD	Deutscher Wetterdienst
HCU	HafenCity Universität Hamburg
FLL	Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau
LAD	Leaf Area Density (Blattflächendichte)
LAI	Leaf Area Index (Blattflächenindex)
MRT	Mean Radiant Temperature (mittlere Strahlungstemperatur)
NBS	Nature-Based Solutions (naturbasierte Lösungen)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (normierter differenzierter Vegetationsindex)
PET	Physiological Equivalent Temperature (Physiologische Äquivalenz-Temperatur)
RISA	RegenInfraStrukturAnpassung
SCS	US Soil Conservation Service
SPSS	IBM SPSS Statistik Software („Superior Performing Software System“)
UCCI	Urban climate change impacts
UGI	Urban Green Infrastructure (urbane grüne Infrastruktur)
UHI	Urban heat island (städtische/urbane Wärmeinsel)

UTCI Universal Thermal Climate Index (Universeller thermischer Klimaindex)

RCP Representative Concentration Pathways (Repräsentative Konzentrationspfade)

WMO World Meteorological Organisation

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Konstanten

CN	Curve Number Wert [-]
C	Abflussbeiwert für Regenereignisse [-]
C _s	Spitzenabflussbeiwert für Regenereignisse nach dem FLL-Verfahren [-]
I _a	Anfangsverlust [mm]
N	Niederschlag [mm]
P _{ANN}	Jahresniederschlagssumme [mm]
P _{MIN}	Niederschlagssumme des trockensten Monats des Jahres [mm]
P _{TH}	Trockenheitsgrenzwert, abhängig von T _{ann} und der jährlichen Niederschlagsverteilung [mm]
P _{SMIN}	Geringste Monatsniederschlagssumme des trockensten Sommermonats
P _{WMIN}	Geringste Monatsniederschlagssumme des trockensten Wintermonats
P _{WMAX}	Höchste Monatsniederschlagssumme des feuchtesten Wintermonats
R ²	Bestimmtheitsmaß, Kennzahl zur Beurteilung der Anpassungsgüte einer Regression
S	potenziell maximaler Rückhalt [mm] (max. Bodenspeicher)
T	Temperatur [°C]
T _{ANN}	Jahresdurchschnittstemperatur in 2m über N.N [°C]
T _{MIN}	Monatsmitteltemperatur des kältesten Monats Im Jahr [°C]
T _{MAX}	Monatsmitteltemperatur des wärmsten Monats des Jahres [°C]
T _{mon}	Monatsmitteltemperatur [°C]
V	Abflussvolumen [mm]
Ψ _a	Jahresabflussbeiwert [-]

Ψ_m mittlerer Abflussbeiwert [-]

Ψ_s Spitzenabflussbeiwert [-]

ϕ Geographische Breite [°]

1. Klimafolgenanpassung und Gebäudebegrünung

1.1 Klimawandel, urbane Wärmeinseln & Stadtentwicklung

Seit der ersten Veröffentlichung über die mögliche Beeinflussung des Klimas durch anthropogene CO₂-Emissionen von Arrhenius im Jahre 1896 (Weart 2008) ist der Klimawandel ein intensiv beforschtes und diskutiertes Phänomen. Man kann mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass sich das Klima derzeit nicht aufgrund natürlicher Faktoren ändert (Storch und Stehr 2007). In den vergangenen Jahren konnte mit Hilfe von Klimamodellen nachgewiesen werden, dass die beobachtete Temperaturänderung der letzten 50 Jahre primär auf den Ausstoß anthropogener Treibhausgase und Aerosole zurückzuführen ist (mit einer Wahrscheinlichkeit > 95 %) (Lozán et al. 2008).

Der globale Klimawandel drückt sich u.a. durch Erhöhungen der durchschnittlichen Luft- und Ozean-temperaturen, Schmelzen von Gletschern und Veränderungen der Niederschlagshöhen- und Verteilungen aus. Wie sich das zukünftige Klima weiterhin ändern wird, hängt sowohl von den bereits emittierten anthropogenen Treibhausgasen als auch von den zukünftigen Emissionen ab. Nach dem IPCC-Bericht (Pachauri et al. 2015) wird sich die mittlere globale oberflächennahe Temperatur je nach gewähltem Emissionsszenario (RCP) für die Periode 2016-2035 um 0,3 – 0,7 °C im Gegensatz zur Periode 1986-2005 erhöhen. Für das Ende des 21. Jh (2081-2100) wird sich der globale Temperaturanstieg nach dem derzeitigen Kenntnisstand wahrscheinlich im Bereich von 0,3 – 1,7 °C (RCP2.6) bis zu 2,6 – 4,8 °C nach Emissionsszenario RCP8.59 bewegen (Pachauri et al. 2015). Ebenso weist der IPCC-Sachstandsbericht (Pachauri et al. 2015) darauf hin, dass es mit ziemlicher Sicherheit zu mehr heißen und weniger kalten Extremtemperaturen kommen wird, es sehr wahrscheinlich zu öfter auftretenden und länger andauern Hitzewellen kommen wird und die Niederschläge in den feucht-gemäßigten Breiten im Mittel zunehmen und die Extremniederschläge öfter und intensiver werden.

Städte sind in diesem Zusammenhang nicht nur wichtige Verursacher mit hohem Anteil an Treibhausgasemissionen, sie sind auch besonders gefährdet durch die Auswirkungen des Klimawandels. Für Stadtregionen sind im Zusammenhang mit dem Klimawandel vielfältige Auswirkungen zu erwarten. Beispiele hierfür sind Schäden durch Starkregen, Hochwasser, Meeresspiegelanstieg, Stürme und Hitzewellen beziehungsweise Trockenperioden. Diese Einflüsse können durch anthropogene Eingriffe wie zunehmende Versiegelung verstärkt werden, z.B. durch Verringerung des Infiltrationsvermögens von Böden. Aufgrund hoher Versiegelungsgrade und Bebauungsdichten weisen Städte veränderte wasserwirtschaftliche und klimatische Bedingungen gegenüber dem Umland auf.

Es kommt in größeren Städten zum sogenannten städtischen Wärmeinseleffekt oder urban heat island effect (UHI). Der Effekt zeigt sich u.a. durch erhöhte Temperaturen in urbanen Gebieten im Gegensatz zu deren Umland. Der UHI entsteht durch die speziellen Charakteristiken urbaner Flächen und deren Nutzung, wie beispielsweise geringerer Albedo, höhere Wärmespeicherkapazitäten, geringe Anteile an Grünflächen und erheblicher anthropogener Wärmeemissionen (Oke 1982). Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass die Intensität des UHI, welche der Temperaturdifferenz der Innenstadt zum Umland entspricht, meist während der Nacht und an sommerlichen Tagen mit geringer Wolkenbedeckung und geringer Windgeschwindigkeit (austauscharme Wetterlagen) den Höhepunkt erreicht (Arnfield 2003). Außerdem erhöht sich die UHI-Intensität mit der Größe der Städte bzw. der Einwohnerzahl (Oke 1973), wobei für diese generelle Annahme schon Ausnahmen gefunden wurden. Beispielsweise wurden für Rostock (Richter et al. 2013) und Saskatoon (Ripley et al. 1996) maximale UHI-Intensitäten an sonnigen Tagen am Nachmittag nachgewiesen und unter bestimmten Bedingungen traten auch teilweise sog. urban cool islands (UCI), z.B. in Reykjavik (Steinecke 1999) und Göteborg (Svensson 2002) auf. Urbane Hitzeinseln können signifikante negative ökologische und ökonomische Auswirkungen, wie beispielsweise Beeinträchtigung des thermischen Komforts, der Luftqualität und erhöhter Energieverbrauch aufgrund der Nutzung von Klimaanlage, zur Folge haben (Li und Bou-Zeid 2013). Durch die stetig steigende Anzahl der in Städten lebenden Menschen werden zukünftig auch immer mehr Menschen dem Risiko von Hitzestress ausgesetzt sein (Scherer et al. 2013). Derzeit scheint nicht geklärt, inwieweit sich Menschen auf die sich schnell ändernden klimatischen Verhältnisse einstellen bzw. akklimatisieren können (Hajad und Kosatky 2009). Einige Studien aus gemäßigten Klimaten in Europa deuten bei häufigerem Auftreten von Hitzewellen auf einen erhöhten Bedarf an Kühlung in Wohngebäuden, Krankenhäusern, Schulen und Arbeitsplätzen in Sommermonaten hin (Baccini et al. 2011; Oudin Åström et al. 2013; Rocklöv und Forsberg 2009; Svensson et al. 2003; Thorsson et al. 2011). Doch bereits heutzutage kann Hitzestress ein lebensbedrohliches Problem in europäischen Städten sein (Scherber et al. 2013; Scherer et al. 2013).

Der urbane Wasserhaushalt ist zudem im Gegensatz zum natürlichen gekennzeichnet durch z.T. starke Versiegelung und demzufolge schnelleren Regenwasserabflüssen von Flächen wie Dächern und Straßen direkt in die Kanalisation, geringere Verdunstung aufgrund fehlender Vegetation und geringere Versickerung und somit gestörter Grundwasserneubildung. Da weniger Niederschlagswasser auf natürliche Weise versickern und verdunsten kann und stattdessen meist direkt in die Kanalisation eingeleitet wird, kommt es bei Starkregenereignissen häufig zur Überlastung von Kanalisationen und somit zu oberflächlichen Überflutungen innerstädtischer Flächen mit teilweise erheblichen Schäden (Richter und Dickhaut 2019). Mit dem fortschreitenden Klimawandel kann es u.a. in Europa trotz steigender

Gesamtjahresniederschlagsmengen zu geringeren Sommerniederschlagsmengen verbunden mit einer Erhöhung der sommerlichen Starkregenintensitäten und längeren Trockenphasen kommen (Arnbjerg-Nielsen et al. 2013). Steigende Intensitäten von Starkregenereignissen würden bedeuten, dass die Kanalisationen im Gegensatz zu heute noch häufiger an ihre Belastungsgrenzen stößt und es öfter zu Überflutungen kommt, was wiederum zu wirtschaftlichen und gesundheitlichen Schäden führen kann (Semadeni-Davies et al. 2008).

Zusätzlich zu dem sich ändernden Klima setzt sich außerdem weltweit die Urbanisierung fort. Dies kann die Folgen des Klimawandels auf lokaler, städtischer Ebene noch verschärfen. 2018 lebte bereits mehr als die Hälfte der Erdbevölkerung in Städten (55 %), 2030 wird erwartet, dass die Zahl auf 60 % steigt (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2018). Auch in Europa herrscht derzeit ein Trend zur Verdichtung urbaner Gebiete (Innenverdichtung) als nachhaltige Planungsprämisse vor, um u.a. effiziente Ressourcennutzung, Transportsysteme und das urbane Leben zu fördern (Haaland und van den Bosch 2015). Unter diesem Aspekt scheint es besonders wichtig, bestehende urbane Grünflächen zu erhalten, neu zu entwickeln, aufzuwerten und zu vernetzen, um den Klimawandelfolgen mithilfe von sog. nature-based solutions (NBS) oder urbanen grünen Infrastrukturen (UGI) entgegenzutreten (Kabisch et al. 2017).

1.2 Gebäudebegrünung & Klimafolgenanpassung

Um den genannten zukünftigen Herausforderungen der Stadtentwicklung zu entgegnen, haben in den letzten Jahren urbane Grünflächen an Bedeutung gewonnen. Die außerordentliche Bedeutung des urbanen Grüns ist auch durch die im Jahr 2013 vom ehemaligen Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) gestartete langfristige Initiative für grünere Städte mit dem Grün- und Weißbuch „Stadtgrün“ in den politischen Fokus gerückt. Da heutzutage in Städten kaum noch Raum zur Schaffung „klassischer“ Grünanlagen wie Parks besteht, bieten vor allem urbane grüne Infrastrukturen (UGI) zukünftiges Umsetzungspotenzial. UGI können als hybride Infrastrukturen aus Grünflächen und gebauten technischen Systemen verstanden werden. Beispiele für UGI sind Dach- und Fassadenbegrünungen sowie Versickerungsanlagen. In einer Broschüre des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) werden urbane grüne Infrastrukturen folgendermaßen definiert (Hansen et al. 2017):

„Urbane grüne Infrastruktur ist ein Netzwerk aus naturnahen und gestalteten Flächen und Elementen in Städten, die so geplant und unterhalten werden, dass sie gemeinsam eine hohe Qualität in Hinblick auf Nutzbarkeit, biologische Vielfalt und Ästhetik aufweisen und ein breites Spektrum an Ökosystemleistungen erbringen. Alle Arten von vegetations- und wassergeprägten Flächen und Einzelementen

können Bestandteile der grünen Infrastruktur sein oder werden, unabhängig von Besitzverhältnissen und Entstehung. Auch versiegelte und bebaute Flächen können durch Entsiegelung, Begrünung, Bepflanzung mit Bäumen als Teil der grünen Infrastruktur qualifiziert werden. Die grüne Infrastruktur in urbanen Räumen wird von verschiedenen staatlichen, wirtschaftlichen und zivilgesellschaftlichen Akteurinnen und Akteuren strategisch geplant, erhalten und entwickelt. Im Sinne einer sozial, ökonomisch und ökologisch nachhaltigen Stadtentwicklung können mit Hilfe der grünen Infrastruktur vielfältige gesellschaftliche Ziele unterstützt werden. Dazu gehören zum Beispiel die Förderung von Gesundheit und Wohlbefinden, Anpassung an den Klimawandel und Schutz der biologischen Vielfalt. Urbane grüne Infrastruktur ergänzt die graue Infrastruktur und kann sie teilweise auch ersetzen. Sie fördert insgesamt die Lebensqualität und Attraktivität von Städten und trägt zur Daseinsvorsorge bei.“

Wie in dieser Definition des BfN erwähnt, können mittels UGIs Klimawandelauswirkungen in Städten verringert werden bzw. können UGI als Klimafolgenanpassungsmaßnahme dienen. Beispielsweise können durch UGI Überflutungsrisiken vermindert und der thermische Komfort verbessert werden.

In dieser Arbeit sollen GUIs hinsichtlich der Quantifizierung ihrer Leistungen zur Abschwächung klimawandelinduzierter Effekte untersucht werden und UGI betreffende Planungsinstrumente bewertet werden. Im Laufe der Bearbeitung dieser Arbeit stellte sich heraus, dass die Fokussierung auf eine bestimmte UGI unumgänglich war, da dadurch eine inhaltliche Qualität und Tiefe sichergestellt werden konnte, die im Rahmen der Betrachtung aller UGI nicht möglich gewesen wäre. Der Fokus dieser Arbeit wurde letztendlich auf Dachbegrünungen gelegt.

Die positiven Aspekte von Dachbegrünungen sind vor allem in den vergangenen Jahrzehnten seit den 1980er Jahren durch intensive Forschung erkannt worden. Die Reduzierung von Heizungs- und Kühlungskosten und die Reduzierung der UHI durch thermische Isolierung und Verschattung und Kühlung durch Evapotranspiration sind beispielsweise durch Fang (2008), Richter (2015) und Takebayashi und Moriyama (2007) beschrieben worden. Dachbegrünungen können Abflüsse infolge von (Stark-)Regenereignissen verringern und verzögern, was auf die Wasserspeicherung auf Pflanzenoberflächen (Interzeption) und in Substraten und die Evapotranspiration von Pflanzen und Substratoberflächen zurückzuführen ist (z. B. Bengtsson 2005; Mentens et al. 2006; Richter und Dickhaut 2019; van Woert et al. 2005). Weitere positive Effekte von Dachbegrünungen sind beispielsweise Lärmreduktion (van Renterghem 2018), Filterung von Luftschadstoffen (Currie und Bass 2008; Yang et al. 2008) und die Erhöhung der urbanen Biodiversität (Dunnett et al. 2008b; Gedge und Kadas 2005), durch welche die Lebensqualität und das menschliche Wohlbefinden in urbanen Gebieten gefördert werden (McGranahan et al. 2007). Im Kontext der Klimafolgenanpassung urbaner Gebiete sind insbesondere die Aspekte der

Verringerung des UHI-Effektes und der Verminderung des Risikos urbaner Sturzfluten von Bedeutung bzw. in den vergangenen Jahren weltweit intensiv beforscht worden. Die Kühlung urbaner Gebiete mittels Dachbegrünung wird von verschiedenen Faktoren gewährleistet (Cameron et al. 2014):

- Verschattung von Oberflächen bzw. Verhinderung direkter solarer Einstrahlung,
- (Evapo-)Transpiration bzw. Verdunstungskühlung durch aktive Verdunstung von Pflanzen (Transpiration) und Verdunstung von Wasseroberflächen (Evaporation), die Abgabe von Wasserdampf in die Atmosphäre bzw. der Phasenübergang entzieht der Umgebungsluft thermische Energie und kühlt diese dadurch,
- Veränderung von Luftströmung und -zirkulation,
- Isolationswirkung durch Substrat- und Pflanzenschichten auf Dächern,
- Veränderung der Albedo von Oberflächen, dadurch erhöhte Reflexion solarer Einstrahlung im Vergleich zu dunkleren Oberflächen,
- Teilweise Absorption solarer Einstrahlung und Umwandlung in Biomasse (Photosynthese).

Die Risikoverminderung urbaner Sturzfluten mittels Dachbegrünung wird hauptsächlich von folgenden Faktoren gewährleistet:

- Interzeption von Regenwasser auf Pflanzenoberflächen,
- Rückhalt und Speicherung von Regenwasser in Substraten,
- Verdunstung von Regenwasser von Pflanzen- und Substratoberflächen (Evaporation),
- Aktive Verdunstung von Regenwasser durch Pflanzen (Transpiration),
- Zeitliche Verzögerung des Regenwasserabflusses durch Zwischenspeicherung in Substraten,
- Ggf. zusätzlicher Regenwasserrückhalt durch Speicherung z.B. in Zisternen zur Bewässerung.

Der Anteil der Regenmengen, die Dachbegrünungen zurückhalten, können mit Abflussbeiwerten beschrieben werden. Diese werden meist von Herstellern verschiedener Systeme aufgrund von Laboruntersuchungen nach den Vorgaben der Forschungsgesellschaft für Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau (FLL) mit Gründächern im „Kleinformat“ bzw. Messtischen bestimmt. Diese sind in der Entwässerungsplanung anerkannt und werden z.B. im Rahmen von Bemessungen von Versickerungsanlagen nach der DWA-A 138 mit Bemessungsregen bis einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von einmal in fünf Jahren genutzt. Für Starkregen, die über diese Ereignisse hinausgehen wird die Retentionswirkung von (extensiven) Dachbegrünungen kaum gewürdigt, wie z.B. beim Überflutungsnachweis nach DIN 1986-100. Es wird davon ausgegangen, dass nach Sättigung des Substrates weiter auf die Dachbegrünung fallender Regen „1:1“ abfließt. Im Rahmen dieser Dissertation soll dieser Effekt näher betrachtet

werden. Einerseits mittels Untersuchungen internationaler Studien und Forschungsergebnisse und andererseits mit der Auswertung langjähriger Gründach-Monitorings aus Hamburg und der Betrachtung unterschiedlicher gemessener Regenereignisse. Besonderes Augenmerk soll auf Wirkungen gelegt werden, die das Verhalten eines Gründachs bei unterschiedlichen Starkregen charakterisieren. Das heißt, zusätzlich zu Abflussbeiwerten steht die Analyse unterschiedlicher, den Wasserrückhalt bestimmender Faktoren, im Vordergrund. Diese sind mengenmäßiger Regenwasserrückhalt und zeitliche Verzögerungen von Abflussbeginn und dem maximalen Abfluss aus dem Gründach. Zusätzlich wird insbesondere auch das Abflussverhalten von Dachbegrünungen bei Vorsättigung bzw. bei mehreren aufeinanderfolgenden Regenereignissen als „worst-case“ Szenario betrachtet werden. In geringem Maße können auch Aussagen zur zeitlichen Veränderung des Regenwasserrückhalts über einige Jahre getroffen werden.

1.3 Dachbegrünung – Grundlagen und Nutzen

1.3.1 Technische Grundlagen

Im Allgemeinen lassen sich Dachbegrünungen nach heutigen Standards wie bspw. der auch international anerkannten Dachbegrünungsrichtlinie der FLL (FLL 2018) prinzipiell in drei verschiedene Begrünungsarten unterteilen, die sich je nach Art der Nutzung, der Bauweise und der Pflanzengesellschaften unterscheiden: die extensive, die einfach-intensive und die intensive Dachbegrünung (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Dachbegrünungstypen und ihre Eigenschaften (FLL 2018).

	Extensivbegrünung	Einfache Intensivbegrünung	Intensivbegrünung
Pflanzengesellschaften	naturnah: Moos-Sedum bis Gras-Kraut	Gras-Kraut-Gehölz	Rasen oder Stauden bis Sträucher und Bäume
Aufbaudicke	6 - 15 cm	12 - 25 cm	15 - 40 cm und höher
Gewicht	60 - 150 kg/m ²	150 - 200 kg/m ²	150 - 500 kg/m ²
Kosten	gering	mittel	hoch
Pflegeaufwand	gering	mittel	hoch
Bewässerung	nur in der Anwuchsphase	periodisch	regelmäßig

Die technischen Elemente für den Aufbau der verschiedenen Gründachtypen sind heutzutage meist prinzipiell die gleichen, wobei bei einigen Gründachtypen auch auf bestimmte Elemente verzichtet wird oder andere Elemente hinzukommen. Die Grundelemente sind (siehe auch Abbildung 1):

- Dachabdichtung
- Wurzelschutz
- Dränschicht
- Filterschicht
- Substrat
- Vegetation

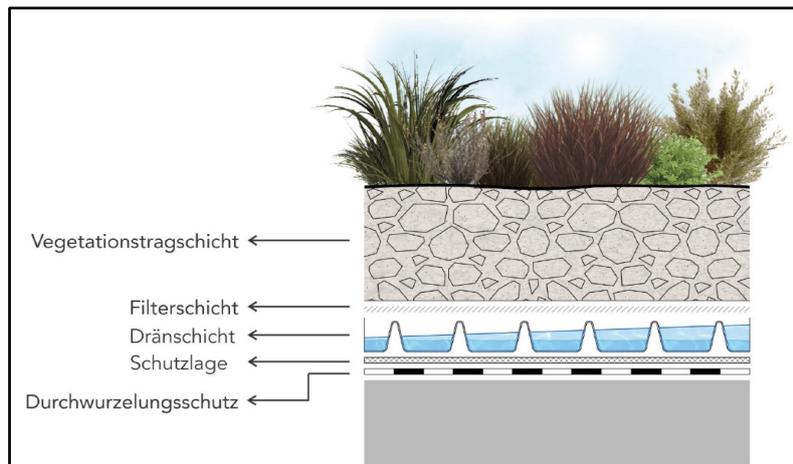


Abbildung 1: Standardisierter Systemaufbau einer Dachbegrünung (Richter und Dickhaut 2019).

Der Stand der Technik zur Planung von Dachbegrünungen ist in der bereits erwähnten „Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen“ der FLL beschrieben. Die Neufassung der Richtlinie von 2018 führt erstmals sogenannte Retentionsdächer auf. Diese können eine zusätzliche Retentionsleistung durch den temporären Anstau von Regenwasser im Begrünungsaufbau über das übliche Maß hinaus erzeugen. Im Folgenden werden die einzelnen Grundelemente ausführlicher beschrieben.

Vegetation

Die Vegetation kann sehr divers ausgeprägt sein mit Gehölzen, Stauden, Gräsern und Kräutern (FLL 2018). Dickblattgewächse bzw. Sukkulente wie verschiedene Sedum- oder Fetthennenarten werden aufgrund ihrer Resistenz gegenüber Trockenheit sehr oft als Bestandteil der Pflanzenmischungen verwendet (FLL 2018). Im Substrat gespeichertes Wasser wird durch Verdunstung über Pflanzenoberflächen (Transpiration) wieder über die Atmosphäre in den Wasserkreislauf zurückgegeben.

Vegetationstragschicht (Substratschicht)

Die Substrat- oder Vegetationstragschicht besteht meist aus speziellen Dachbegrünungssubstraten, die je nach Begrünungsart und bautechnischen Anforderungen ausgewählt werden (FLL 2018). Sie bestehen meist aus Mischungen leichter und poröser mineralischer Bestandteile mit hoher Wasserspeicherkapazität und guten Drainageeigenschaften und geringen Anteilen organischer Substanz. Sie dienen einerseits zur Verankerung und Nährstoffversorgung der Pflanzen und andererseits erfüllen sie bedeutende wasserwirtschaftliche Aufgaben. Niederschlagswasser infiltriert langsam und wird gespeichert, im Falle der Wassersättigung wird Überschusswasser an die Dränschicht abgegeben. Aufgrund der schwammartigen Wirkung kann in der Vegetationstragschicht ein großer Anteil des Regenwassers im Wurzelbereich der Pflanzen gespeichert werden (Geiger 2009). Die Ausgestaltung der Substratschicht ist ein wesentlicher Faktor für deren Wasserspeicherkapazität, das Pflanzenwachstum und deren Artenzusammensetzung.

Filterschicht

Die Filterschicht zwischen der Vegetationstragschicht und der Dränschicht verhindert, dass feinere Boden- und Substrateile aus der Vegetationstragschicht in die Dränschicht eingeschlämmt werden und die Wasserdurchlässigkeit dieser Schicht beeinträchtigen (FLL 2018). Das Filtervlies sollte durchwurzelbar sein, um das gespeicherte Wasser für die Pflanzenwurzeln verfügbar zu machen (FLL 2018).

Dränschicht

Die Dränschicht oder Drainageschicht nimmt überschüssiges, aus dem Substrat herablaufendes Regenwasser auf und leitet es in die Dachabläufe (FLL 2018). Je nach Typ dient sie zusätzlich als lang- oder kurzfristiger Wasserspeicher oder kann beispielsweise die Ableitung des Überschusswasser gezielt verzögern. Wenn in der Dränschicht Wasser gespeichert wird, kann dieses in Trockenperioden zur Versorgung der Pflanzen mit Wasser und anderen Nährstoffen dienen. Sie ist meist durchwurzelbar, sorgt außerdem für eine ausreichende Belüftung und schützt den darunterliegenden Aufbau (FLL 2018).

Schuttlage / Schutzschicht

Die Schutzlage stellt einen zusätzlichen Schutz für die Dachabdichtung bzw. den Durchwurzelungsschutz dar. Sie kann ggf. zusätzlich Wasser und Nährstoffe speichern und auch gleichzeitig Trennlage zwischen der Dränschicht und dem Dachaufbau sein (FLL 2018).

Wurzelschutz

Wurzelschutzlagen dienen dazu, die Dachabdichtung vor Durchwurzelung und damit Leckage zu schützen. Meist besteht sie aus einer dünnen Polyethylenbahn. Sie wird nicht benötigt, wenn die Dachabdichtung als wurzelresistent zertifiziert ist (Beecham et al. 2019).

1.3.2 Stadtökologische Auswirkungen von Dachbegrünungen

Im Folgenden wird ein grundlegender Überblick über die Vielzahl der stadtökologischen Wirkungen von Dachbegrünungen gegeben. Detailliertere Informationen zu den klimafolgenanpassungsrelevanten Wirkungen werden als Ergebnis des systematischen Literatur-Reviews in Kapitel 3.2 gegeben.

Effekte auf den urbanen Wasserkreislauf

Am intensivsten ist vermutlich die Veränderung der Niederschlagsabflussverhältnisse von Gründächern gegenüber konventionellen Dächern erforscht. Es ist mittlerweile bekannt und vielerorts nachgewiesen worden, dass durch Dachbegrünung die Regenwasserabflüsse reduziert und verzögert werden und dadurch das Risiko urbaner Sturzfluten verringert und der städtische Wasserhaushalt verbessert bzw. an den natürlichen angenähert werden kann (Bengtsson et al. 2005; Mentens et al. 2006; van Woert et al. 2005). In Abbildung 2 sind idealisierte, typische Niederschlags- und Abflusskurven dargestellt, die das hydrologische Verhalten von Dachbegrünungen darstellen.

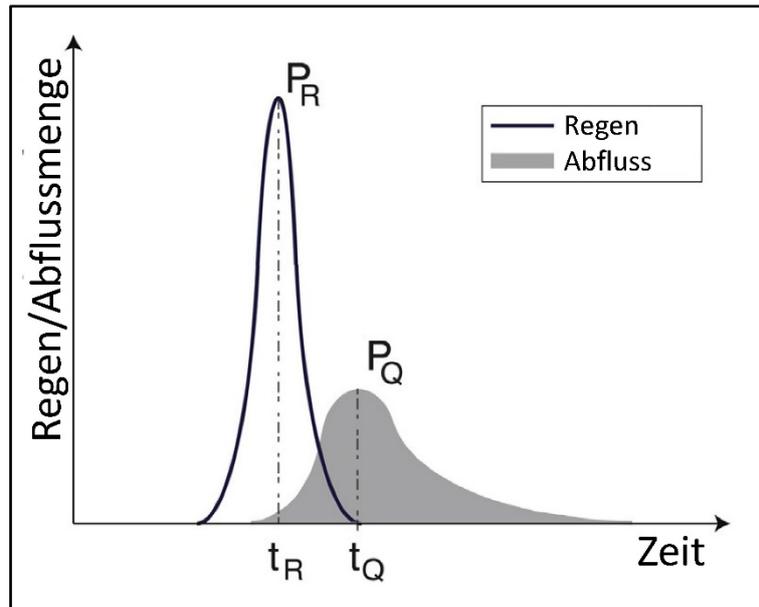


Abbildung 2: Idealierte Niederschlags- und Abfluss-Ganglinie mit Niederschlags- (P_R) und Abflusspeak (P_Q) und zugehörigen Zeitpunkten (t_R , t_Q) (Hakimdavar et al. 2014).

Typischerweise kommt es zu einer deutlichen Verzögerung des zeitlichen Beginns des Niederschlagsabflusses vom Dach und demnach auch zu einer Verzögerung der Abflussspitzen (Zeitpunkt t_Q) gegenüber der maximalen Regenintensität (Zeitpunkt t_R). Außerdem ist die maximale Abflussintensität (P_Q) deutlich geringer als die des Niederschlags (P_R). Somit nimmt der Spitzenabflussbeiwert ψ_s (Quotient aus maximaler Abflussspende P_Q und maximaler Regenspende P_R) meist deutlich ab und sinkt unter 1. Die Gesamtabflussmenge (gemäß Abbildung 2 die Fläche unter der jeweiligen Kurve) vom Dach ist typischerweise deutlich vermindert gegenüber der Gesamtniederschlagsmenge, die auf das Dach gefallen ist. Die Niederschlagsrückhaltung entsteht durch die (Zwischen-)Speicherung des Wassers auf den Pflanzenoberflächen und in Substrat und Drainageschicht. Nach der Sättigung der einzelnen Schichten fließt das überschüssige Wasser zeitverzögert ab. Somit werden Abflussspitzen gedämpft, wodurch die Entwässerungssysteme entlastet und die Gefahr von durch Starkregen induzierten urbanen Überflutungen verringert wird (Brune et al. 2017). Die Menge an zurückgehaltenem Niederschlag hängt nach den FLL-Dachbegrünungsrichtlinien (FLL 2018) vor allem von der Mächtigkeit der Substratschichten ab (Tabelle 2). So ist der Jahresabflussbeiwert ψ_a beispielsweise 0,5 für extensive Dachbegrünungen mit 6 - 10 cm Aufbaudicke, d.h. es wird 50 % des Jahresniederschlags auf dem Dach zurückgehalten. Für detaillierte Informationen zu den Angaben in der Richtlinie und zum Verfahren der Bestimmung des sog. FLL-Abflussbeiwerts siehe Kapitel 1.4.1 und FLL (2018).

Biodiversität

Dachbegrünungen stellen sowohl Habitats als auch Vernetzungs- bzw. Trittsteinbiotope für die urbane Flora und Fauna dar und können somit einen erheblichen Beitrag zur Erhöhung der urbanen Biodiversität leisten. Nach Köhler und Poll (2010) sollte ein Gründach eine Substratmächtigkeit von mindestens 12 cm haben, um das ökologische Potenzial auszuschöpfen.

Klimaschutz

Durch die Umsetzung von Biomasse an Dachbegrünungen bzw. deren Bewuchs kommt es zur jährlichen Akkumulation von CO₂ in der Spannbreite von 0,375 – 30,12 kg CO₂ pro m² (Besir und Cuce 2018).

Reduzierung Gebäudeenergieverbrauch

Dachbegrünungen bzw. deren einzelne Schichten wirken als Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung auf das Gebäudedach und zusätzlich als Isolationsschicht. Die Reduktion der Gebäudeenergie zum Heizen im Winterhalbjahr und zur Kühlung in den wärmeren Monaten hängt allerdings von verschiedenen Faktoren ab. Dazu zählen u.a. die evtl. schon vorhandene Isolierung, Substratstärke, Wärmeleitkoeffizient des Substrates und der Wassergehalt bzw. die Verdunstungsleistung (Susca 2019). Quantitative Effekte variieren deutlich, wie bspw. Francis und Jensen (2017) zeigten. Bei deren Review von mehr als 20 Studien zum jährlichen Gebäudeenergieverbrauch zeigten Dachbegrünungen einen Effekt von -7 % bis +70 % Einsparung des Energieverbrauchs, wobei der Effekt in der kühlen von -12 % - 90 % und in der warmen Jahreshälfte eine Streuung von -20 % - 48 % aufwies (Francis und Jensen 2017).

Luftreinhaltung

Dachbegrünungen können über ihre Pflanzenoberflächen Schadstoffe aus der Luft filtern. Die Effektivität hängt vor allem von der Dichte der Pflanzen ab, mit dichterem Bewuchs bzw. höherem NDVI werden mehr Schadstoffe zurückgehalten (Speak et al. 2012). Zu den Schadstoffen, die effektiv aus der Luft gefiltert werden können, gehören u.a. PM₁₀ (jährliche Akkumulation in Gramm pro m² Dachfläche: 0,42 – 9,1), SO₂ (0,1-1,01 g/m²), NO₂ (0,37-3,75 g/m²) und O₃ (1,24-7,17 g/m²)(Daten aus einem Vergleich von 4 Studien in Speak et al. (2012)).

Hitzeinsel

Dachbegrünungen tragen dazu bei, die urbane Hitzeinsel zumindest in deren unmittelbaren Umgebung abzuschwächen. Der Anteil an dunklen Flächen wird durch die Bepflanzung reduziert, durch die höhere Albedo wird mehr Sonnenlicht reflektiert. Der Großteil der solaren Einstrahlung, die absorbiert wurde,

wird außerdem genutzt bzw. umgewandelt (Photosynthese, Evapotranspiration) und nicht als Wärmestrahlung wieder an die Umgebung abgegeben (Hamdi und Schayes 2008). Taleghani et al. (2016) gaben als maximale Abkühlung der städtischen Lufttemperaturen etwa 0,3 - 3 °C bei einer großräumigen Umsetzung von Dachbegrünungen an.

1.4 Quantifizierung von Klimafolgenanpassungsleistungen in Regelwerken

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über nationale und internationale Regelwerke und Leitfäden bezüglich Dachbegrünungen. Der Fokus liegt hier vor allem auf dem Hauptthema dieser Arbeit, der Quantifizierung von Klimafolgenanpassungspotenzialen in den Dokumenten. Es wird explizit nicht auf Regelungen zur Umsetzung wie z.B. Vorgaben in B-Plänen eingegangen. Es wurde vielmehr untersucht, ob und in welchem Umfang bzw. mit welcher Präzisierung in verschiedenen Dokumenten auf die Quantifizierung der Wirkungen eingegangen wird. Die Literaturstudie diente als Voraussetzung für die in Kapitel 4 erarbeiteten und in Kapitel 5 diskutierten Empfehlungen. Grundsätzlich zeigt sich die Vorreiterrolle Deutschlands mit der FLL als federführende Institution zur Verfassung von Richtlinien hinsichtlich Gebäudebegrünung im internationalen Kontext. Das dürfte wohl auch eine Folge der jahrzehntlang gewachsenen Strukturen in Forschung und Praxis sein. Viele im internationalen Kontext entwickelten Regelwerke beziehen sich auf die FLL-Richtlinien für Dachbegrünungen (FLL 2018). In den letzten Jahren sind in vielen Ländern und Städten von Asien, Nordamerika und der EU verbindliche Vorgaben zum Bau von Gebäudebegrünungen entstanden. Diese beziehen sich meist auf Neubauten und hier vor allem Dachbegrünungen. Für detaillierte Informationen über die genutzten Vorgaben und Instrumente wird an dieser Stelle auf verschiedene Reviews, z.B. Berardi et al. (2014) und Stern et al. (2019) verwiesen.

1.4.1 Wasserwirtschaftliche Effekte Dachbegrünungen

Die für viele internationale Richtlinien als Vorbild dienende FLL-Dachbegrünungsrichtlinie (FLL 2018) enthält in Kapitel 9.3 (S.57) ausführliche Aussagen zur Wasserrückhaltung mittels Dachbegrünungen:

“Die Verringerung des Wasserabflusses aus Niederschlägen, die pflanzenverfügbare Speicherung des zurückgehaltenen Niederschlagswassers und die Verzögerung des Abflusses von Überschusswasser sind wesentliche Wirkungen von Dachbegrünungen. Sie sind aus ökologischer, entwässerungstechnischer und ökonomischer Sicht von Bedeutung.“

Darauffolgend werden zur Kennzeichnung der Wirkungen herangezogene Kenngrößen erläutert (FLL 2018): maximale Wasserkapazität, Wasserdurchlässigkeit, Abflussbeiwert, Jahresabflussbeiwert, Abflussverzögerung und zusätzliche Retentionsleistung (Retentionsdächer). Zur Bewertung von Potenzialen zur Klimafolgenanpassung werden in dieser Arbeit Abflussbeiwerte und die Abflussverzögerung betrachtet. Zur Bemessung von Dachentwässerungen sind nach der Richtlinie für Dachbegrünungen die Spitzenabflussbeiwerte C_s gemäß DIN 1986-100 (Deutsches Institut für Normung 2016a) zu verwenden. Als Orientierungswerte sind nach FLL (2018) die in Tabelle 2 aufgeführten Werte anzuwenden. Die angegebenen Werte wurden nach dem ebenfalls in der Richtlinie beschriebenen Verfahren ermittelt. Sie werden an unbegrüntem Bauweisen und mit einem 15-minütigen Bemessungsregen mit einer Intensität von 300 l/(s*ha) nach vorangehender Wassersättigung und 24-stündigem abtropfen lassen bestimmt (FLL 2018). C_s wird dann aus dem Quotient des Wasserabflusses aus der Dachbegrünung in 15 Minuten und der Regenmenge in 15 Minuten berechnet. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass standort- und/oder produktspezifische Werte durch in der Siedlungswasserwirtschaft gebräuchliche Simulationsverfahren ermittelt werden können. Die in der Richtlinie angegebenen Jahresabflussbeiwerte Ψ_a kennzeichnen nach DIN 4045 (Deutsches Institut für Normung 2016b) das Verhältnis der jährlichen Regenabflusssumme zum jährlichen Regenvolumen (FLL 2018), wobei sich die in Tabelle 2 angegebenen Werte auf Standorte mit 650 – 800 mm Jahresniederschlag beziehen.

Tabelle 2: Jahres- und Spitzenabflussbeiwerte für Dachbegrünungen und andere Dachflächen nach (FLL 2018).

Aufbaudicke [cm]	Jahresabflussbeiwert Ψ_a	Spitzenabflussbeiwert C_s	
		Dachneigung < 5°	Dachneigung > 5°
2-4	0,6	0,7	0,8
>4-6	0,55	0,6	0,7
>6-10	0,5	0,5	0,6
>10-15	0,45	0,4	0,5
>15-25	0,4	0,3	
>25-50	0,3	0,2	
>50	≤0,10	0,1	

In Anlehnung an die FLL-Richtlinie wurden die Spitzenabflussbeiwerte in verschiedene ingenieurtechnische Regelwerke übernommen, beispielhaft seien an dieser Stelle genannt:

- DIN 1986-100: Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056 (Deutsches Institut für Normung 2016a)

- DWA-M 153 Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser (DWA 2007)
- DWA-A 117 Bemessung von Regenrückhalteräumen (DWA 2013)
- DWA-A 138 Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser (DWA 2005, 2020)

Die Differenzierung in den DWA-Regelwerken nimmt nur zwei unterschiedliche Werte an und wird als mittlerer Abflussbeiwert (Ψ_m) bezeichnet, für Gründächer mit ≥ 10 cm Aufbau ($\Psi_m = 0,3$) und < 10 cm Aufbau ($\Psi_m = 0,5$). Der mittlere Abflussbeiwert entspricht dem Quotienten aus Abflussvolumen und Niederschlagsvolumen für einen definierten Zeitraum (DWA 2007). In dieser Arbeit wird als definierter Zeitraum jeweils die Zeit angenommen, bis das gesamte Überschusswasser aus der Dachbegrünung abgefließen ist, also der Quotient aus Gesamt-Abfluss zu Gesamt-Niederschlagsmenge eines Ereignisses bzw. eines Jahres, einer Jahreszeit oder Monats. Die Abflussbeiwerte werden auch international übernommen, beispielsweise verweisen die Schweizer Norm SIA 312 (Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein 2013) und auch die Guidelines der im Vereinigten Königreich ansässigen Construction Industry Research and Information Association (CIRIA, Ballard et al. 2015) auf die Europäische Norm EN 12056-3 (Deutsches Institut für Normung 2001), welche die Werte der FLL-Richtlinie beinhaltet. Auch außerhalb des europäischen Raums werden die Daten übernommen bzw. basieren Richtlinien zur Gebäudebegrünung auf der FLL-Richtlinie. Als eines von vielen Beispielen seien hier die Konstruktionsstandards für Dachbegrünungen von Toronto genannt (City of Toronto Green Roof Technical Advisory Group 2009).

Alternative Berechnungsansätze von Gründachabflüssen in technischen Regelwerken sind vor allem im nordamerikanischen Raum zu finden, wo einzelne Städte eigene technische Richtlinien formuliert haben. Die Ansätze beruhen entweder auf Abflussbeiwerten oder sog. Runoff-Curve-Number Werten (CN) des US Soil Conservation Service (SCS). Die Ansätze basieren ebenfalls auf der Anhängigkeit des Abflusses von Regenmengen oder Substratstärken. Ein Abflussbeiwert-Ansatz wird beispielsweise in Chicago genutzt. Die Stadt hat ein Handbuch „Stormwater Management Ordinance Manual“ (City of Chicago 2016) ausgearbeitet, um bestimmte Berechnungsvorgaben für Neubau- und Sanierungsprojekte vorzugeben. In Kombination mit dem Handbuch wurde ein Excel-Sheet mit Vorgaben zu Berechnungen des Regenwassermanagements entwickelt, in welchem mit Abflussbeiwerten für einzelne „best-management-practices“ (dezentrale Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen) gerechnet wird. Im Tabellenblatt „Rate Control“ (siehe Abbildung 3) werden für Dachbegrünungen für verschiedene Substratstärken Abflussbeiwerte von 0,5 ($< 10,2$ cm) bis 0,1 ($> 50,8$ cm) für das 100-jährliche Regenereignis angenommen.

<u>Runoff Calculation</u>		Proposed Area (sq ft)	C-Value 100-Year	Storage Volume (cu ft)
Pervious Land	Lawns - Sandy soil, flat, 0% to 2%		0,18	
	Lawns - Sandy soil, avg, 2% to 7%		0,27	
	Lawns - Sandy soil, steep, >7%		0,36	
	Lawns - Heavy soil, flat, 0% to 2%		0,30	
	Lawns - Heavy soil, avg, 2% to 7%		0,42	
	Lawns - Heavy soil, steep, >7%		0,47	
	Woodlands, flat, 2%		0,39	
	Native Vegetation with prepared soils		0,10	
	Dry bottom basins to HWL		0,75	
	Wetland		0,80	
	Green Roof		0,50	
Impervious Land	Gravel		0,70	
	Pavement		0,95	
	Roofs (conventional)		0,95	
	Critical building sidewall (enter 25% of the face of the largest sidewall draining to lower level roofs or side gutters)		0,95	
	Wet bottom basins to HWL		1,00	
BMP areas	BMPs providing storage that WILL COUNT toward detention storage (from Worksheet 1.2)	0	1,00	
	BMPs providing volume control storage that WILL NOT BE COUNTED toward detention (from Worksheet 1.2)	0		0

Green Roof C-Values =
 0.5 for <4" depth
 0.3 for 4"-8" depth
 0.2 for 9"-20" depth
 0.1 for >20" depth

Abbildung 3: Auszug aus dem sog. Stormwater control sheet der Stadt Chicago mit vorgegebenen Abflussbeiwerten C für best management practices (City of Chicago 2016).

In vielen weiteren nordamerikanischen Städten wird das Verfahren des SCS genutzt, um für Bemessungsaufgaben den abflusswirksamen Anteil des Niederschlags in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe und einiger gebietspezifischer Parameter für Boden und Vegetation unter Berücksichtigung des Bodenfeuchtezustands zu bestimmen. Für jeden Zeitpunkt der Summenlinien gilt folgende Beziehung (Maniak 2010):

$$V = \frac{(N - I_a)^2}{N - I_a + S}$$

- V Abflussvolumen [mm] (= effektiver Niederschlag N_b)
- N Niederschlag [mm]
- I_a Anfangsverlust [mm]
- S potenziell maximaler Rückhalt [mm] (max. Bodenspeicher)

Das maximale Speichervermögen S wird aus dem CN-Wert berechnet, welcher in Abhängigkeit von dem Boden, seiner Nutzung und der Vorfeuchte von 0 bis 100 reichen kann (Maniak 2010):

$$S = 25,2 \times \left[\left(\frac{1000}{CN} \right) - 10 \right]$$

CN Curve Number Wert [-]

Beispiele für CN-Werte verschiedener Landnutzungstypen („Cover Type“) und Bodengruppen bzw -klassen („Hydrologic Soil Group A-D, Ub) sind in Abbildung 4 dargestellt. Die einzelnen Bodengruppen unterscheiden sich in deren Versickerungsfähigkeit.

Unter Gruppe A werden Böden mit großem Versickerungsvermögen (>8 mm/h), auch nach starker Vorbefeuchtung, z.B. tiefgründige Sand- und Kiesböden eingeordnet;

Gruppe B beinhaltet Böden mit mittlerem Versickerungsvermögen (>4 mm/h), tief- bis mäßig tiefgründige Böden mit mäßig feiner bis mäßig grober Textur wie z.B. Sandböden, Löß, (schwach)lehmiger Sand;

In Gruppe C sind Böden mit geringem Versickerungsvermögen (>1 mm/h), Böden mit feiner bis mäßig feiner Textur oder mit wasserstauender Schicht wie z.B. flachgründige Feinsande und sandiger Lehm;

Und in Gruppe D Böden mit sehr geringem Versickerungsvermögen (<1 mm/h) wie Tonböden, sehr flache Böden über nahezu undurchlässigem Material und Böden mit dauernd sehr hohem Grundwasserspiegel (Maniak 2010).

Zusätzlich wird der Einfluss der Vorfeuchte in drei Bodenfeuchteklassen berücksichtigt. Meist wird von der Bodenfeuchteklasse II ausgegangen, welche einer 5-tägigen Niederschlagssumme zwischen 30 und 50 mm während der Vegetationszeit und 15 bis 30 mm außerhalb der Wachstumszeit entspricht (Maniak 2010).

Cover Description		Curve Number for Hydrologic Soil Group				
COVER TYPE	HYDROLOGIC CONDITION	A	B	C	D	Ub*
Lawns, parks, golf courses, etc.						
	Poor (grass cover <50%)	68	79	86	89	79
	Fair (grass cover 50–75%)	49	69	79	84	69
	Good (grass cover >75%)	39	61	74	80	61
Brush (brush-weed-grass mixture with brush the major element)						
	Poor	57	73	82	86	73
	Fair	43	65	76	82	65
	Good	32	58	72	79	58
Wood-grass combination (orchard or tree farm)						
	Poor	57	73	82	86	73
	Fair	43	65	76	82	65
	Good	32	58	72	79	58
Woods						
	Poor	45	66	77	83	66
	Fair	36	60	73	79	60
	Good	30	55	70	77	55
Paved parking lots, roofs, driveways, streets, etc.		98	98	98	98	98
Gravel/Crushed Stone		76	85	89	91	89
Dirt Streets and Roads		72	82	87	89	87
Green Roof**		86	86	86	86	86
Athletic Field		68	79	86	89	79
Porous Pavement		70	70	74	80	70
Permeable Pavers		70	70	79	84	70
Pour-in-Place Rubber		70	70	74	80	70
Porous Turf		70	70	79	84	69
Meadow		30	58	71	78	58

* Ub refers to "Urban Land" and generally conforms to a hydrological soil group classification of B. A Ub curve number must be used on Redevelopment projects unless the engineer provides soil mapping indicative of another, more appropriate, soil classification.

** Existing rainfall runoff models are limited in their ability to predict runoff from green roofs since this process is dominated by percolations through a thin veneer of soil and is not surface runoff. Green roof research studies have back-calculated a range of curve number values for various storms and roof media types/thicknesses. Alternative curve number values may be applied when supported by submitted analysis and relevant references, which will be reviewed on a case-by-case basis.

Abbildung 4: Zur Berechnung der Regenwasser-Abflüsse von verschiedenen Flächen mittels SCS-Verfahren vorgeschlagenen CN-Werte für Philadelphia (Philadelphia Water Department 2020).

Kombiniert man die vorangegangenen Gleichungen erhält man für die Summenlinie des Abflusses in Abhängigkeit des Niederschlags (Maniak 2010):

$$V = \frac{\left[\left(\frac{N}{25,4}\right) - \left(I_a \times \frac{10}{CN}\right) + \left(\frac{I_a}{10}\right)\right]^2}{\left[\left(\frac{N}{25,4}\right) + \left(\frac{1000 - I_a \times 10}{CN}\right)\right] - \left(10 - \frac{I_a}{10}\right)} \times 25,4$$

Beispiele solcher Summenlinien sind für verschiedene CN-Werte und Bodenfeuchteklassen in Abbildung 5 dargestellt.

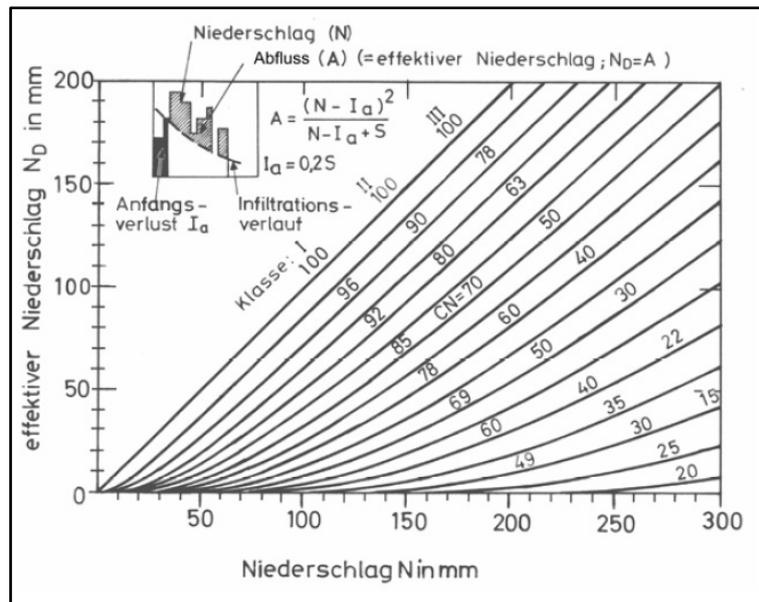


Abbildung 5: Mittels SCS-Verfahren ermittelte Summenlinien des Abflusses bzw. effektiven Niederschlags (Gutknecht 1978).

In Portland wird u.a. eine minimale Aufbaudicke von 4 inches (ca. 10 cm) vorgegeben (Bureau of Environmental Services 2020). Der Regenwasserrückhalt wird dann mittels einer Konzentrationszeit von 5 Minuten und über einen gewichteten CN-Wert für eine Dachfläche ermittelt. Gewichtet bedeutet in dem Fall, dass die versiegelten Flächenanteile des Daches mit einem CN von 98 und die Anteile des begrünten Daches mit einem CN von 61 in die Berechnung eingehen (Bureau of Environmental Services 2020). Die genutzten CN-Werte sind u.a. aufgrund klimatischer Eigenschaften und bestimmter baulicher Vorgaben zu den Dachbegrünungen regional unterschiedlich. Im Gegensatz zum o.g. CN-Wert von 61 wird in Philadelphia der Abfluss der gesamten Fläche eines Gründachs mit dem CN-Wert von 86 berechnet (siehe Abbildung 4, Philadelphia Water Department 2020). Hier wird auch darauf hingewiesen, dass bei begründeten Fällen auch alternative CN-Werte vorgeschlagen werden können (** in Abbildung 4).

1.4.2 Stadtklimatische Effekte Dachbegrünungen

Zu stadtklimatischen Effekten von Dachbegrünungen sind sowohl national als auch international bisher nur rudimentäre Ansätze der Quantifizierung in die Regelwerke eingegangen. Das dürfte vor allem an der bisher im Vergleich zum Regenwasserrückhalt wenig erforschten Thematik liegen. Der Effekt der Temperaturminderung im Umfeld von begrünten Dächern hat keine jahrzehntelange Forschungstradition vorzuweisen. Die FLL Dachbegrünungsrichtlinie (FLL 2018) enthält in Kapitel 6.3, „Ökologische Funktionen und Wirkungen“, lediglich qualitative Aussagen zur Beeinflussung der Temperaturen im Umfeld von Dachbegrünungen (S. 27):

„Verbesserung des Kleinklimas durch Ausgleich von Temperaturextremen, Verminderung der Rückstrahlungsintensität auf benachbarte Bereiche, Erhöhung der Luftfeuchtigkeit und Verbesserung der Staubbindung im Vergleich zu einer frei bewitterten oder bekiesten Dachabdichtung.“

Und folgend in Kapitel 6.4 („Schützende und ökonomische Funktionen und Wirkungen“, S. 27):

„Verbesserung des winterlichen und insbesondere des sommerlichen Wärmeschutzes“.

Die VDI-Richtlinie 3787 Stadtentwicklung im Klimawandel (VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b: Umweltmeteorologie VDI-Handbuch Architektur, Blatt 8) benennt im Kapitel 5 („Klimagerechte Stadtentwicklung – Empfehlungen von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel“), Unterkapitel 5.1.3 („Gebäudebezogenes Grün“, S. 33), einen quantitativen Effekt von Dachbegrünungen bezüglich der Wärmeinselreduktion (Verein Deutscher Ingenieure 2020):

„Bei großflächig ausgeführten Dachbegrünungen kann das Temperaturniveau der urbanen Wärmeinsel fallweise um bis zu 1,5 °C reduziert werden.“

Wobei nicht spezifiziert wird was mit „großflächig“ gemeint ist. Der Wert 1,5 °C bezieht sich auf die Studie von Heusinger et al. (2018), in welcher Simulationen auf Grundlage der Eddy-Kovarianz-Messungen einer 8600 m² großen Dachbegrünung durchgeführt wurden.

2. Methodik: Systematischer Review, Meta-Analyse und Gründach-Monitorings

In diesem Kapitel werden nach der Formulierung der Forschungsfragen die Methodik zur Bewertung von Klimafolgenanpassungsleistungen von Dachbegrünungen anhand eines systematischen Reviewverfahrens beschrieben. Hierbei lag der Fokus vor allem auf dem möglichen Rückhalt von Starkregen und der Reduzierung der UHI. Durch Übertragung der Erkenntnisse in eine Datenbank konnten die potenziellen Wirkungen und deren Abhängigkeiten von geographischen Regionen, meteorologischen Vorbedingungen und technischen Konstruktionsdetails mittels Meta-Analyse quantifiziert werden. Im Weiteren wird die Vorgehensweise zur Messung und Bewertung von Regenwasserrückhalt durch Dachbegrünungen an Hamburger Beispielen dargestellt und die Erstellung eines Regressionsmodells zur Vorhersage der Abflussmengen von Dachbegrünungen beschrieben. Die Ergebnisse aus den beiden methodischen Teilprojekten wurden in einem vergleichenden Kapitel zur Bewertung nationalen und internationalen Regelwerken zusammengeführt. Die Zusammenfassung der Methodischen Vorgehensweise ist in Abbildung 6 grafisch dargestellt.

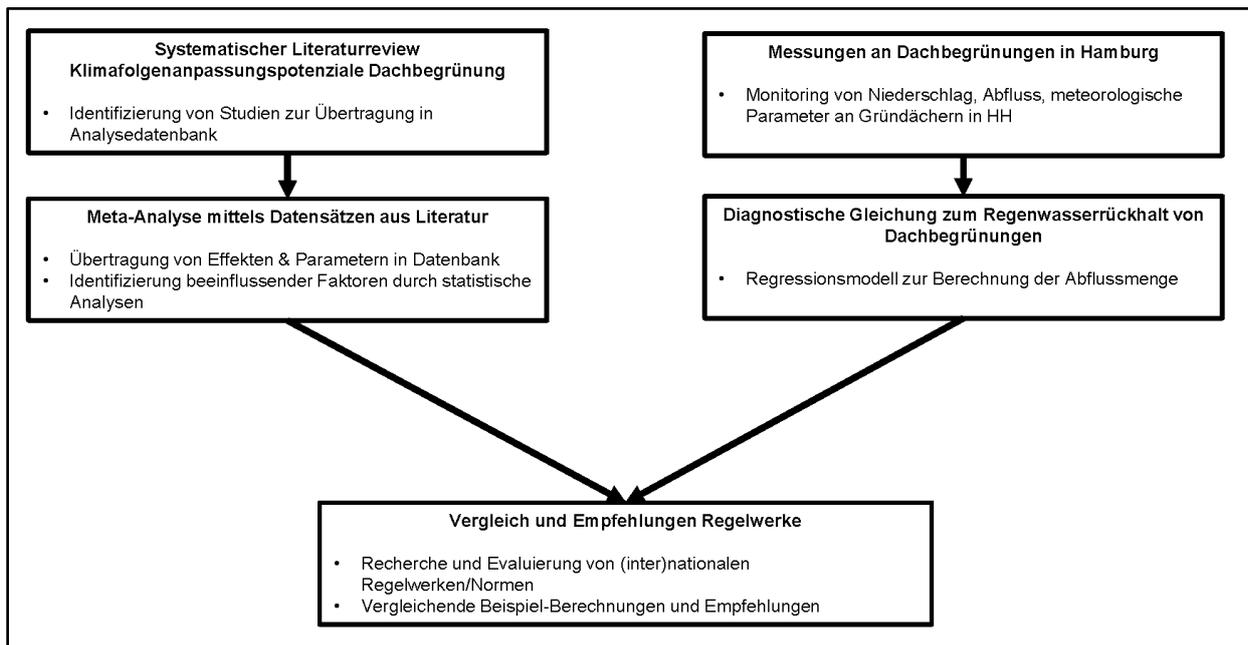


Abbildung 6: Zusammenfassende Grafik der in der Arbeit genutzten Methoden.

2.1 Forschungsfragen

Zur Quantifizierung der Wirkungen von Dachbegrünungen ist bisher insbesondere zur Verringerung des Wärmeinseleffekts und zum Regenwasserrückhalt geforscht worden. Diese zielen auch auf die,

zumindest in Mitteleuropa, bedeutendsten Klimawandelauswirkungen auf Städte ab, da durch diese wohl das größte Risiko bezüglich menschlicher Gesundheit und Schäden an Infrastrukturen ausgeht. Bass, Krayenhoff, und Martilli (2002) haben beispielsweise potenzielle Temperaturreduzierungen um bis zu 2 °C für einige Gebiete Torontos durch Dachbegrünungen berechnet. Die Forschungen zum Regenwassermanagement mit Dachbegrünungen, wie bspw. an der HCU zur Begleitung der Hamburger Gründachstrategie ab 2014, haben bereits Faktoren bestimmen können, die die Menge an zurückgehaltenem Regenwasser beeinflussen können und so auch die Effektivität der Kühlungsleistung mitbestimmen. Die Wasserspeicherung hängt demnach ab von der Dachneigung (Getter et al. 2007), der Höhe des Substrats (van Woert et al. 2005), verschiedener Regeneigenschaften wie Dauer und Intensität (Razzaghmanesh and Beecham 2014), der Jahreszeit (Mentens et al. 2006), der Vorfeuchte des Substrats (Berndtsson 2010), dem Alter des Daches (Speak et al. 2013a), den Pflanzenarten (Dunnett et al. 2008a) und dem Substrattyp bzw. der Substratzusammensetzung (Graceson et al. 2013). In der Dachbegrünungsrichtlinie (FLL 2018) sind Werte für das Wasserrückhaltevermögen in Abhängigkeit von Substratdicken aufgeführt, welche nach einem normierten Verfahren ermittelt wurden und derzeit auch in verschiedenen Regelwerken, auch international, Anerkennung finden und bspw. in Richter und Dickhaut (2016) anhand gemessener Daten evaluiert wurden. Insgesamt ist zu erkennen, dass die quantitative Forschung zu Wirkungen von Dachbegrünungen auch wegen der längeren Zeiträume der Beforschung gegenüber Fassadenbegrünungen noch deutlich dominiert. Die Effekte von Dachbegrünungen sollten allerdings aufgrund technischer Ähnlichkeiten in gewissem Maße auch auf Fassadenbegrünungen übertragbar sein. Wie (Demuzere et al. 2014) in ihrer Studie zu grünen Infrastrukturen feststellten, ist es derzeit noch schwer, die tatsächlichen (quantitativen) Wirkungen abzuschätzen. Häufig ist nicht klar, inwiefern die Ergebnisse bestimmter Studien übertragbar sind auf andere spezifische Konditionen und räumliche Aspekte.

Daraus ergeben sich für das Dissertationsvorhaben folgende Forschungsfragen:

1. Welche Leistungen zur Anpassung an die Folgend des Klimawandels bezüglich Verminderung der urbanen Hitzeinsel und Verringerung des Überflutungsrisikos können Dachbegrünungen bieten? Sind diese für verschiedenen urbane Räume quantifizierbar?
2. Welche Abhängigkeiten bestehen zwischen den konkreten Anpassungsleistungen und den (klimatischen) Rahmenbedingungen? Wie sind diese Abhängigkeiten in ein einfaches Vorhersagemodell zu übersetzen?

3. Werden die Dachbegrünungen betreffenden Regelwerke den Leistungen zur Klimafolgenanpassung gerecht? Wie könnten diese eventuell zukünftig verändert werden, um sie in Bemessungsverfahren realitätsnah abzubilden?

2.2 Systematischer Review internationaler Forschungsliteratur zu Klimafolgenanpassung durch Dachbegrünung

Ein systematischer Review dient zur Übersicht einer klar formulierten wissenschaftlichen Fragestellung, die systematisch mit spezifischen Methoden relevante Forschungsergebnisse identifiziert, auswählt und kritisch beurteilt (Moher et al. 2009). Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein systematischer Review nach den Richtlinien der Collaboration for Environmental Evidence (Collaboration for Environmental Evidence 2018) durchgeführt. Diese Richtlinien sind frei verfügbar und somit für jeden nachvollziehbar, reproduzierbar und sind ähnlich zu anderen Richtlinien für systematische Review Verfahren (Chapman et al. 2017). Die Methode stammt ursprünglich aus bzw. wurde lange Zeit hauptsächlich in den Gesundheits- oder medizinischen Wissenschaften verwendet. Mittlerweile wird sie aber auch in den Umwelt- und Naturwissenschaften regelmäßig angewandt (Westgate und Lindenmayer 2017). Dieses spezifische, robuste und transparente Verfahren wurde gewählt, um einen möglichst weitreichenden, im besten Fall nahezu vollumfänglichen Überblick über die bisher zumindest in wissenschaftlichen Studien in deutscher und englischer Sprache veröffentlichten Erkenntnisse zu erlangen. Für dieses Ziel schien die Methode des systematischen Reviews gegenüber anderen Review Verfahren wie z.B. narrativen Reviews geeigneter.

2.2.1 Schrittweises Vorgehen im Review-Prozess mittels Datenbanksuche

Um einen systematischen Review-Prozess zu beginnen, muss zunächst die Forschungsfrage klar formuliert sein, da ansonsten keine zielführende Datenbanksuche durchgeführt werden kann. Dieser Frage werden definierte Elemente (PICO) zugeordnet (Collaboration for Environmental Evidence 2018; Pullin und Stewart 2006):

- **Population/Problem:** Welche Population oder Studieneinheit bzw. welches Problem wird adressiert?
- **Intervention:** Wie wird interveniert/welcher Behandlung oder welchen Faktoren wird die Population/Studieneinheit ausgesetzt?

- **Comparison:** Wird die Intervention mit einem Zustand ohne Intervention oder einer alternativen Intervention ausgesetzt und damit verglichen?
- **Outcome:** Was sind die möglichen Ergebnisse der Intervention?

Den einzelnen PICO Elementen werden dann Schlagwörter oder Schlüsselwörter zur Datenbanksuche zugeordnet. Dabei muss beachtet werden, dass bestimmte Schlüsselwörter insbesondere international auch unterschiedliche Bezeichnungen haben können, welche alle mit in die Datenbanksuche übernommen werden müssen, um bspw. bestimmte geographische Regionen nicht von der Suche auszuschließen. An der Vielzahl möglicher englischer Bezeichnungen des Begriffs „Dachbegrünung“ wird das besonders deutlich. Als Schlagwörter wurden dafür folgende Begriffe verwendet: „green roof“, „living roof“, „roof greening“, „eco roof“, „blue-green roof“. Diese Begriffe werden dann in der Datenbanksuche mit den Operatoren AND und OR kombiniert, um die Suchergebnisse zu spezifizieren. Das heißt, dass alle Schlagwörter eines PICO-Elements bzw. deren Faktoren mit OR und die Elemente untereinander mit AND verknüpft werden (Abbildung 7). Für das Element „Comparison“ wurden in dieser Studie keine expliziten Schlagwörter mit in die Datenbanksuche einbezogen, da sich bei verschiedenen Vorversuchen gezeigt hat, dass dieses Vorgehen zum Ausschluss einer Vielzahl von Studien führen würde. Mit Hilfe dieser Schlagwörter wurde dann in wissenschaftlichen Datenbanken nach Studien gesucht. Es konnten in diesem Rahmen bis Ende 2019 veröffentlichte Untersuchungen berücksichtigt werden. Die durchsuchten Datenbanken waren „Web of Science / Science Citation Index Expanded“, eine Aufsatzdatenbank mit mehreren Millionen Titelnachweisen aus allen Bereichen der Naturwissenschaften, Medizin und Ingenieurwissenschaften aus mehr als 8.800 ausgewerteten Zeitschriften (www.webofknowledge.com). Und als weitere Datenbank die „Directory of Open Access Journals“, eine fachübergreifende öffentlich zugängliche online-Datenbank mit mehr als 5 Mio. Artikeln aus mehr als 15.000 peer reviewed Journals (www.doaj.org/). In den Datenbanken wurden die Artikel jeweils nach Auftreten der gegebenen Schlagwort-Kombinationen innerhalb der Informationen gesucht, also ob die Schlagwörter in Titel, Artikel-Schlagwörtern oder Zusammenfassungen der Artikel auftreten. Zusätzlich zu den über die systematische Methode aufgefundenen Artikeln und Berichten wurden weitere nach dem „Schneeballprinzip“ ausgewählt. Das heißt, dass in den Literaturangaben der gefundenen Artikel nach weiteren thematisch relevanten Dokumenten gesucht wurde, die nicht über die Schlagwörter suche in den Datenbanken auftauchten. Außerdem wurden weitere Artikel zur Auswertung hinzugezogen, die dem Autor bereits bekannt durch Empfehlungen, Newsletter, Konferenzbeiträge usw. waren, wobei es sich dabei auch oft um deutschsprachige Studien handelte, die in den englischsprachigen Datenbanken nicht gefunden worden wären.

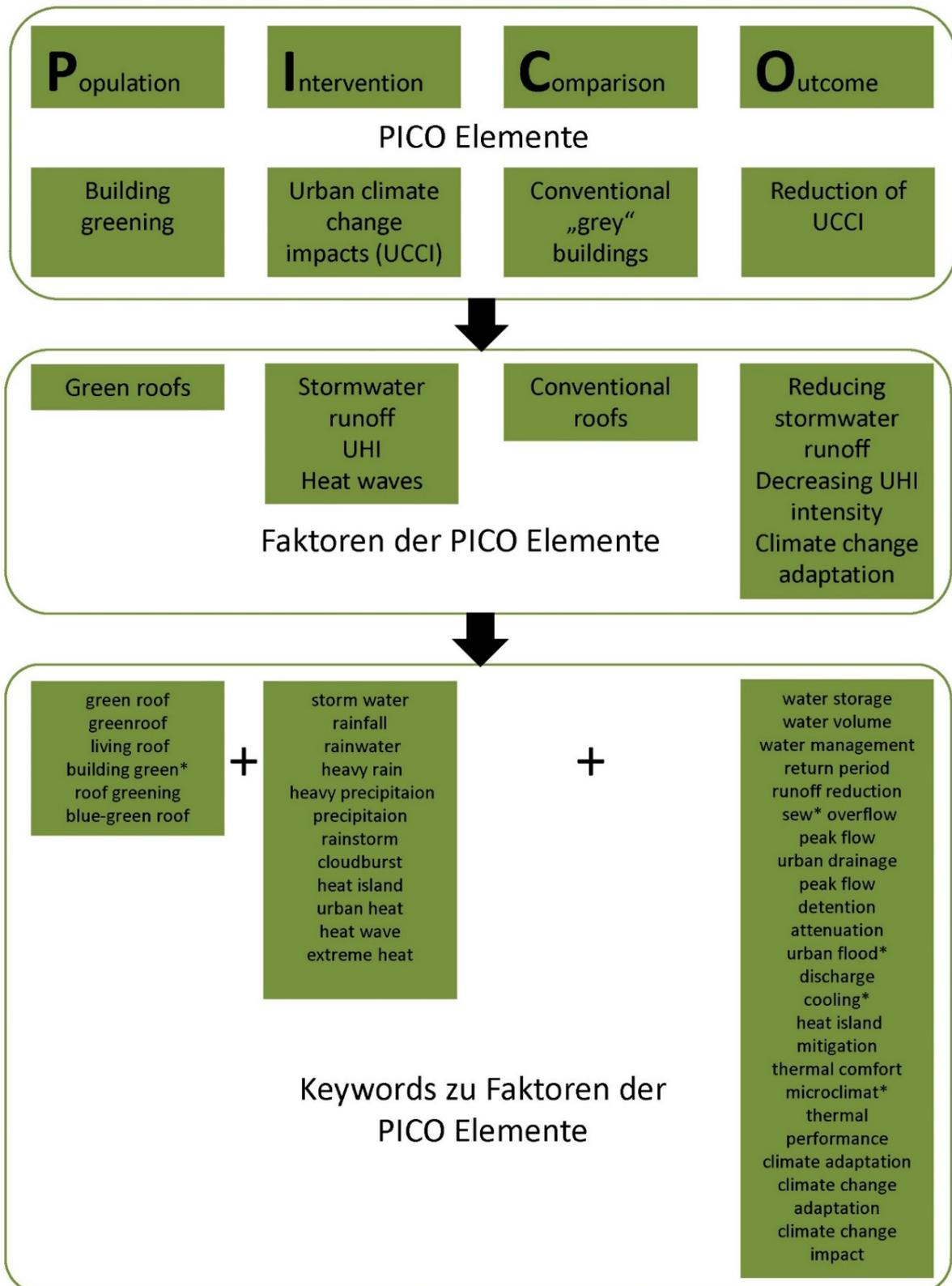


Abbildung 7: Schematischer Ansatz des Vorgehens bei der Datenbanksuche mit multiplen Schlagwörtern und Verknüpfung der PICO Elemente.

Dieses Vorgehen beinhaltet allerdings eventuell auch eine Verzerrung der Ergebnisse bezüglich der Repräsentativität der Auswertungen, da nur englisch- und deutschsprachige Studien genutzt wurden.

Im nächsten Schritt wurden die Studien aus der Datenbanksuche über mehrere Stufen hinsichtlich der thematischen Relevanz und der Möglichkeit quantitative Aussagen zu extrahieren, ausgewählt. Dabei wurden im ersten Schritt alle Titel überprüft und offensichtlich nicht passende Artikel aussortiert. Im nächsten Schritt wurden alle Zusammenfassungen gelesen, um die Eignung zu prüfen. Unpassende Studien wurden wiederum aussortiert. Alle verbleibenden Studien wurden als relevant zur möglichen Extraktion quantitativer Daten eingestuft und anhand ihres Volltextes analysiert. Detaillierte quantitative Angaben zu den gefundenen Studien und der Auswahl und Analyse sind in Kapitel 3.1. zu dargelegt.

2.2.2 Extraktion der Forschungsdaten und Übertragung in die Analyse-Datenbank

Aus den Studien wurden sowohl die klimafolgenanpassungsrelevanten Effekte wie Beitrag zur Risikoverminderung urbaner Sturzfluten und Reduzierung des UHI-Effekts als auch deren studienspezifischen technischen und geographischen Faktoren weitestgehend extrahiert. Hinsichtlich der UHI-Reduktion wurden als relevante Faktoren das Abkühlungspotenzial von Dachbegrünungen in deren unmittelbarer Nähe und insbesondere auch im Straßenraum oder dem Raum zwischen Gebäuden auf 1-2 m Höhe, also in Bodennähe und in der Umgebung von z.B. Fußgänger:innen, identifiziert. Entsprechend wurden für den Regenwasserrückhalt mit Dachbegrünungen Faktoren wie Abfluss und Retention von einzelnen Regenereignissen, Spitzenabflussbeiwerte, jährlicher Wasserrückhalt, Abflussverzögerung und Spitzenabflussverzögerung extrahiert. Zusätzlich wurde unterschieden zwischen Modellierungsstudien und Studien, die anhand gemessener Daten Ergebnisse berichteten. Eine vollständige Liste der möglichen zu extrahierenden Parameter ist in Tabelle 3 aufgezeigt. Hierbei sei angemerkt, dass nicht in allen Studien alle Parameter beinhaltet waren bzw. darüber berichtet wurde. Die vollständigen Analyse-Datenbanken sind im digitalen Tabellenanhang (2 & 3) einsehbar.

Tabelle 3: Aus den Studien extrahierte mögliche Parameter.

Studienspezifische technische Charakteristiken und Umweltfaktoren	Klimafolgenanpassungsrelevante Effekte
Autor	Oberflächentemperaturen
Jahr der Veröffentlichung	Oberflächennahe Temperaturen
Stadt	Lufttemperaturen in 1-2 m Höhe
Land	Mean radiant temperature (MRT)
Koordinaten	Physiological equivalent temperature (PET)
Klimaklassifikation nach Köppen-Geiger	Universal Thermal Climate Index (UTCI)
Zeitraum der Datenaufnahme	Niederschlagscharakteristiken (Menge/Dauer)
Modellstudie/Messung	Retention (Abflussbeiwerte, Volumetrische Retention)
Modelltyp	Abflussverzögerung
Skala (Labor/Gebäude/oStraße/Quartier/Stadt-	Anfangskonditionen der Bodenfeuchte (ADWP)
Nutzungs- oder Gebäudeklassifizierung	
Pflanzenbedeckungsgrad	
Gründachtyp	
Pflanzenarten	
Flächengröße	
Substratspezifikation (Stärke/ Zusammensetzung)	
Pflanzenspezifische Charakteristiken (LAD/LAI)	
Position der Messungen	

2.3 Durchführung der Meta-Analyse mittels statistischer Verfahren

Die Suche nach neuen oder verbesserten wissenschaftlichen Erkenntnissen kann durch die Anwendung verschiedenster, der Problemstellung möglichst angepasster, Methoden erfolgen. Vor allem in den Sozialwissenschaften besteht dabei grundsätzlich die Wahl zwischen einer „Primäruntersuchung“ und einer „Sekundäranalyse“ (Stamm und Schwarb 1995). Letztere bezieht ihr Datenmaterial nicht aus der Labor- oder Feldforschung, sondern aus den Resultaten bereits vorliegender Primäruntersuchungen. Eine Sekundäranalyse hat also zum Ziel, einen Überblick schon verfügbarer Forschungsergebnisse zu geben und neue Fragen zu beantworten. Dies dient zur Darstellung der zu einem Thema bereits existierenden Forschung oder der Zusammenführung unabhängiger Resultate, um allgemeingültigere Ergebnisse zu erhalten (Glass 1976). Die zunehmende Notwendigkeit einer Informationsverdichtung und

-bewertung hat aufgrund der zunehmenden Anzahl publizierter wissenschaftlicher Untersuchungen zu unterschiedlichen Methoden der Ergebniszusammenfassung geführt (Eisend 2009). Diese Methoden umfassen u.a. qualitative Ergebniszusammenfassungen wie Synopsen und Übersichtsartikel (Reviews) und quantitative Ergebniszusammenfassungen (Metaanalysen) (Eisend 2009). Der Begriff „Metaanalyse“ wurde erstmals im Jahre 1976 in einer Studie von Gene Glass („Primary, Secondary, and Meta-Analysis of Research“, Glass 1976, S. 3) verwendet:

„Meta-analysis refers to the analysis of analyses. I use it to refer to the statistical analysis results of a large collection of analysis results from individual studies for the purpose of integrating the findings“

Die Vorsilbe „Meta“ soll ausdrücken, dass es sich dabei um einen Vorgang handelt, der auf sich selbst nochmals angewendet wird (Stamm und Schwarb 1995). Eine sehr weite und umfassende Definition, welche die gesamte Methodenfamilie der Metaanalyse einschließt, leitet z.B. Drinkmann (1990) her:

„Metaanalyse soll sein: eine an den Kriterien empirischer Forschung orientierte Methode zur quantitativen Integration der Ergebnisse empirischer Untersuchungen sowie zur Analyse der Variabilität dieser Ergebnisse.“

In diesem Kapitel werden die Grundlagen von Meta-Analysen dargestellt und die in dieser Arbeit verwendeten statistischen Verfahren erläutert, welche zur Meta-Analyse der aus den Studien generierten Daten zum Klimafolgenanpassungspotenzial von Dachbegrünungen verwendet wurden. Die statistischen Verfahren wurden zusätzlich zur Analyse der Messdaten von Dachbegrünungen in Hamburg verwendet, werden hier aber stellvertretend für die ganze Arbeit eingeführt.

2.3.1 Grundlagen Meta-Analyse

Meta-Analysen analysieren und integrieren quantitative Ergebnisse einzelner Untersuchungen mit statistischen Methoden, wodurch sich Regelmäßigkeiten von Variablenausprägungen und -beziehungen über verschiedene Datensätze hinweg generalisierend prüfen lassen (Eisend 2009). Meta-Analysen beinhalten statistische Verfahren mit denen versucht wird, auf dieselben Fragestellungen wie in den Primärstudien zuverlässigere Antworten zu erhalten und, falls entsprechende Daten vorhanden sind, Einflussfaktoren zu finden, welche die Korrelation der Einzeluntersuchungen beeinflusst haben (Stamm und Schwarb 1995). Diese Eigenschaften machen die Methode für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen interessant, da eben die Prüfung von Variablenausprägungen (Effekte der Klimafolgenanpassung) und deren Beziehungen in den Forschungsfragen formuliert wurden. In Abbildung 8 sind die prinzipiellen Arbeitsschritte einer Meta-Analyse aufgezeigt.

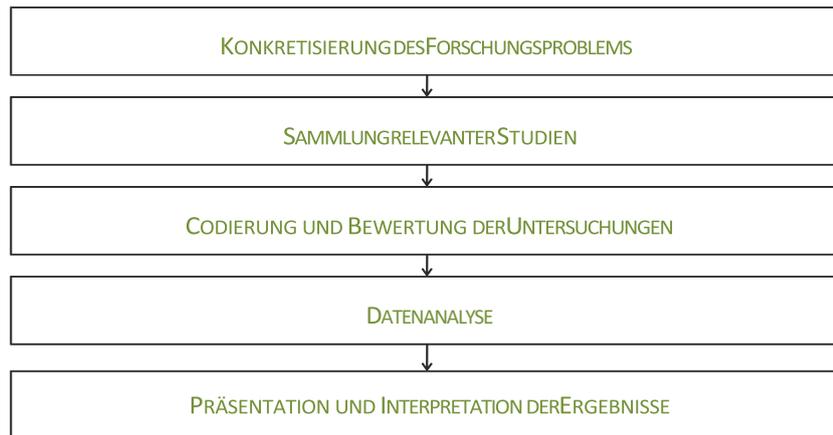


Abbildung 8: Prozess einer Meta-Analyse (nach Eisend (2009))

Als erster Schritt der Analyse muss die Forschungsfrage präzise definiert sein, um zielgerichtet mit der systematischen Suche nach Primärstudien zu beginnen (Stamm und Schwarb 1995). In dieser Arbeit dient die Konkretisierung des Forschungsproblems außerdem zur Festlegung der PICO-Elemente des systematischen Reviews (Kapitel 2.2). Die folgenden Schritte, die Sammlung relevanter Studien und die Codierung und Bewertung der Untersuchungen, sind in diesem Fall ebenfalls im Prozess des systematischen Reviews bearbeitet worden und in Kapitel 2.2 beschrieben. Grundsätzlich bedingt die Bearbeitung dieser Arbeitsschritte der Meta-Analyse nicht eines systematischen Reviewverfahrens, auch andere Methoden sind geeignet. Die Arbeitsschritte „Datenanalyse“, „Präsentation“ und „Interpretation“ werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

2.3.2 Statistische Verfahren

Die im Rahmen der Meta-Analyse zu Klimafolgenanpassungsleistungen von Dachbegrünungen und der Auswertungen eigener Messreihen zum Regenwasserrückhalt von Dachbegrünungen genutzten statistischen Verfahren und Kennwerte werden im Folgenden zusammenfassend beschrieben (Tabelle 4). Für tieferegehende Informationen zur Berechnung und unterschiedlichen Voraussetzungen zur Anwendung der Verfahren wird an dieser Stelle auf weitergehende Fachliteratur verwiesen, z.B.:

Schönwiese, C.-D. (2013): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. 5., vollst. überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Borntraeger.

Hennemuth, B.; Mudelsee, M. (2013): Statistical methods for the analysis of simulated and observed climate data. Applied in projects and institutions dealing with climate change impact and adaptation. Climate Service Center. Hamburg (CSC-Report / Climate Service Center).

Tabelle 4: Im Rahmen der Meta-Analyse und Auswertung der aufgenommenen Messdaten genutzten statistischen Verfahren und Kennwerte.

Statistische Verfahren/ Kennwerte	Ziel	Beschreibung
(arithmetischer) Mittelwert	Durchschnitt von z.B. einer Vielzahl von Messwerten	Summe aller Werte geteilt durch deren Anzahl
Median	Zentralwert von z.B. einer Vielzahl von Messwerten	Mittlerer Wert einer der Größe nach geordneten Folge von z.B. bestimmten Messwerten
Standardabweichung	Variationsmaß von Daten	Wird über die quadratischen Abweichungen der Daten vom arithmetischen Mittelwert berechnet
Varianz	Variationsmaß von Daten	Quadrat der Standardabweichung
Kruskal-Wallis Test	Unterschied zwischen Mittelwerten unterschiedlicher Datensätze	Hypothesentest zur Prüfung, ob sich Mittelwerte von mehr als zwei unabhängigen Stichproben voneinander unterscheiden
Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA = analysis of variance)	Unterschied zwischen Mittelwerten unterschiedlicher Datensätze	Hypothesentest zur Prüfung, ob sich Mittelwerte von mehr als zwei unabhängigen Stichproben voneinander unterscheiden
Bivariate lineare Regression	Untersuchung eines linearen Zusammenhangs zwischen zwei Variablen	Untersuchung eines linearen Zusammenhangs zwischen einer abhängigen (y) und unabhängigen (x) Variable. Als Ergebnis beschreibt die Regressionsgleichung eine Gerade der Form $y = a_0 + a_1x$, wobei a_0 den Schnittpunkt der Gerade mit der y-Achse und a_1 die Steigung der Gerade beschreibt. Die Ausgleichsgerade zwischen den Größen stellt durch die Methode der kleinsten Quadrate und die damit einhergehende Minimierung der Residuen (rote Linien in Abbildung 18) eine möglichst gute Anpassung an alle gemessenen Werte dar
Multiple lineare Regression	Untersuchung eines linearen Zusammenhangs zwischen mehreren Variablen	Untersuchung eines linearen Zusammenhangs zwischen einer abhängigen (y) und mehreren unabhängigen (x) Variablen. Detaillierte Informationen zum Verfahren im Rahmen der Arbeit werden in Kapitel 2.5 zur Erstellung einer diagnostischen Gleichung gegeben

2.4 Monitoring Gründach

Zur Bestimmung der Regenwasserretentionsleistung „realer“ Gründächer wurde das Dach des 2013 fertiggestellten Neubaus der HafenCity Universität Hamburg mit Messinstrumenten ausgestattet. Das Gründach wurde im Jahr 2013 aufgebracht und im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau & Reaktorsicherheit (BMUB) geförderten Forschungsprojekts „Begleitung einer Hamburger Gründachstrategie – Wissenschaftliche Begleitung – Wasserwirtschaft & Übertragbarkeit“ (Förderkennzeichen 03DAS032, Laufzeit 01.09.2014 – 30.06.2017) im Frühjahr 2015 mit Messtechnik ausgestattet. Seit 2015 werden kontinuierlich klimatische Daten und der Regenwasserabfluss des Daches aufgezeichnet (Richter und Dickhaut 2019). Weitere Gründächer, deren Bau und Ausstattung mit Messtechnik im Rahmen dieses Forschungsprojekts begleitet wurden, sind in Hamburg-Ohlsdorf als RISA-Pilotprojekt „Am Weißenberge“ gebaut worden. Die Daten dieser unterschiedlichen Dachbegrünungstypen werden als Vergleichswerte herangezogen.

2.4.1 Gründach auf dem HCU Gebäude

Auf dem Dach der HafenCity Universität wurde ein Extensivdach mit dem Systemaufbau „Industrie-gründach“ der Firma Zinco GmbH installiert (Abbildung 9). Das Substrat mit einer Mächtigkeit von 60 mm besteht aus Zincolith (speziell aufbereitete Tonziegel) angereichert mit Zincohum (Substratkompost mit Faserstoffen).

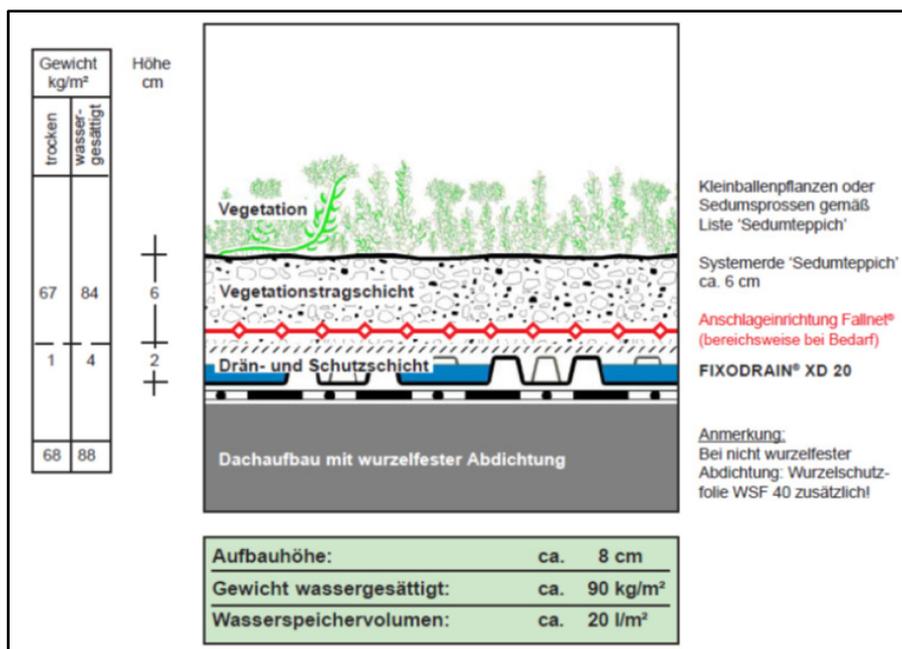


Abbildung 9: Aufbauschema des extensiven Gründachs des HCU-Gebäudes (© Zinco GmbH).

Tabelle 5: Pflanzenliste "Sedumteppich" (Zinco GmbH).

Botanischer Name	Deutscher Name
<i>Phedimus ellacombianus</i> *	
<i>Phedimus floriferus 'Diffusum'</i> *	Ausgebreitetes Garten-Fettblatt
<i>Phedimus floriferus 'Weihenstephaner Gold'</i>	Weihenstephaner-Fetthenne
<i>Phedimus hybridus 'Immergrünchen'</i>	Mongolen-Fetthenne
<i>Phedimus kamschaticus</i>	Kamtschatka-Fetthenne
<i>Phedimus spurius</i>	Kaukasus-Fetthenne
<i>Sedum album</i>	Weißer Mauerpfeffer
<i>Sedum montanum 'Jenny'</i> *	Berg-Mauerpfeffer
<i>Sedum reflexum</i>	Tripmadam
<i>Sedum sexangulare</i>	Milder Mauerpfeffer

Als 20 mm starke kombinierte Filter- und Drainageschicht wurde der Typ Fixodrain XD 20 verbaut. Laut Hersteller hat der Aufbau ein Wasserspeichervolumen von 20 l/m² und ein Gewicht im wassergesättigten Zustand von etwa 90 kg/m². Die durch eine Klebesaat im Jahr 2014 aufgebrauchten Pflanzenarten entsprechen der Pflanzenliste „Sedumteppich“ mit für extensive Dachbegrünung typischen Pflanzenarten, d.h. hauptsächlich Sedum- und Fetthennen-Arten (Tabelle 5). Pflegemaßnahmen wie Düngung und Entfernung von Fremdwuchs erfolgten jeweils im Frühjahr 2015, 2016 und 2017. Ab März 2015 wurden, mit wenigen Ausnahmen, monatliche Fotos der gleichen 1 m² Transekte (n = 10) des Pflanzenbedeckungsgrades am nord-östlichen Teil des Daches aufgenommen.

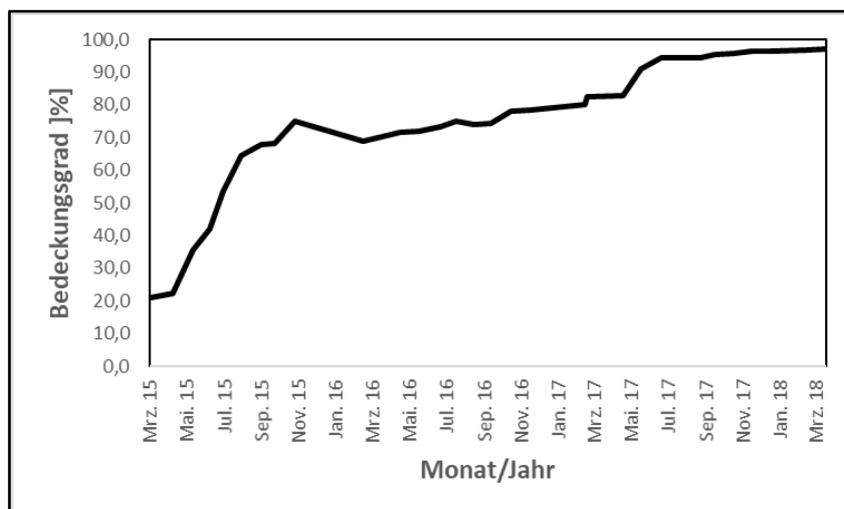
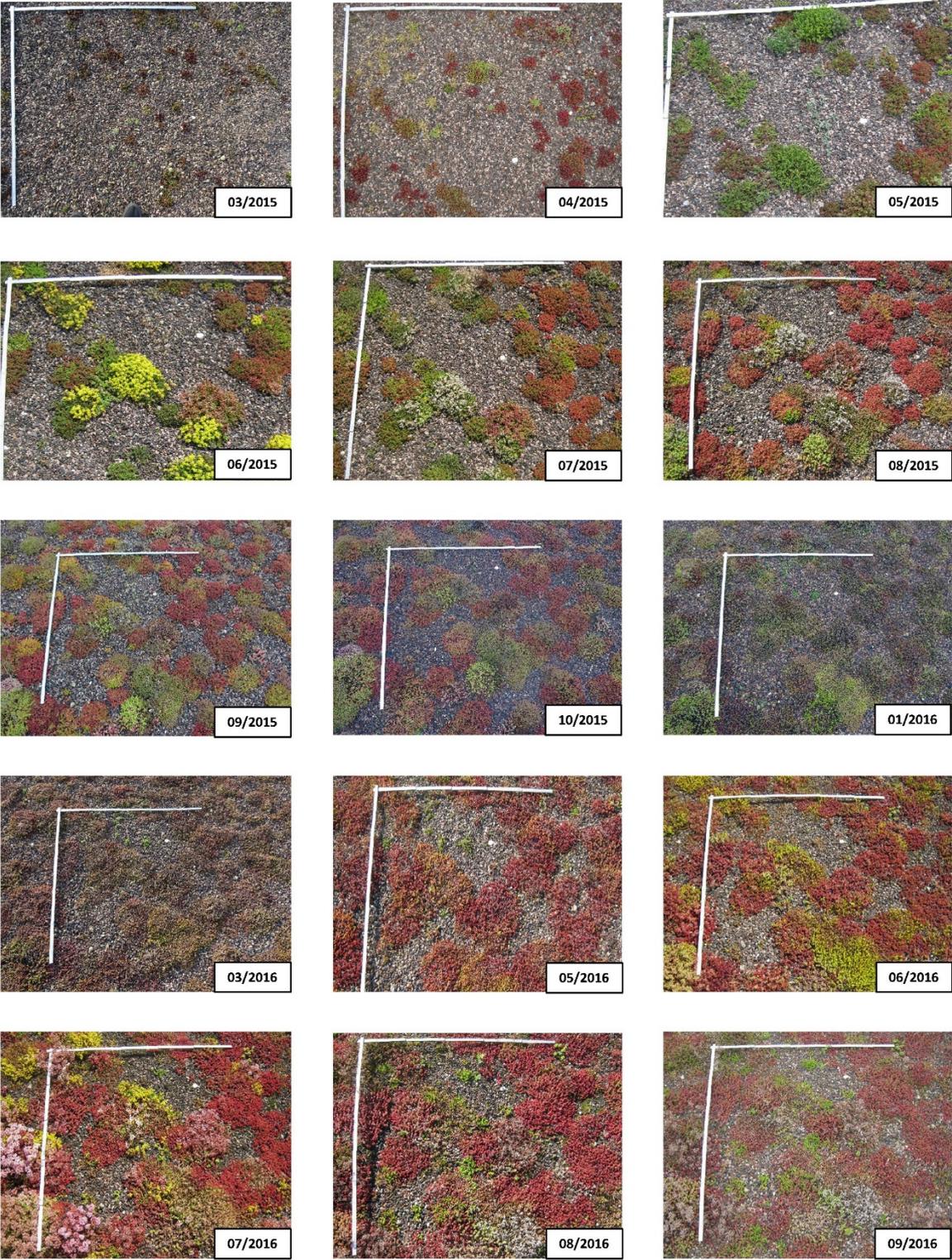


Abbildung 10: Zeitliche Entwicklung des mittleren Pflanzenbedeckungsgrades der Dachbegrünung auf dem HCU Gebäude von März 2015 bis März 2018.



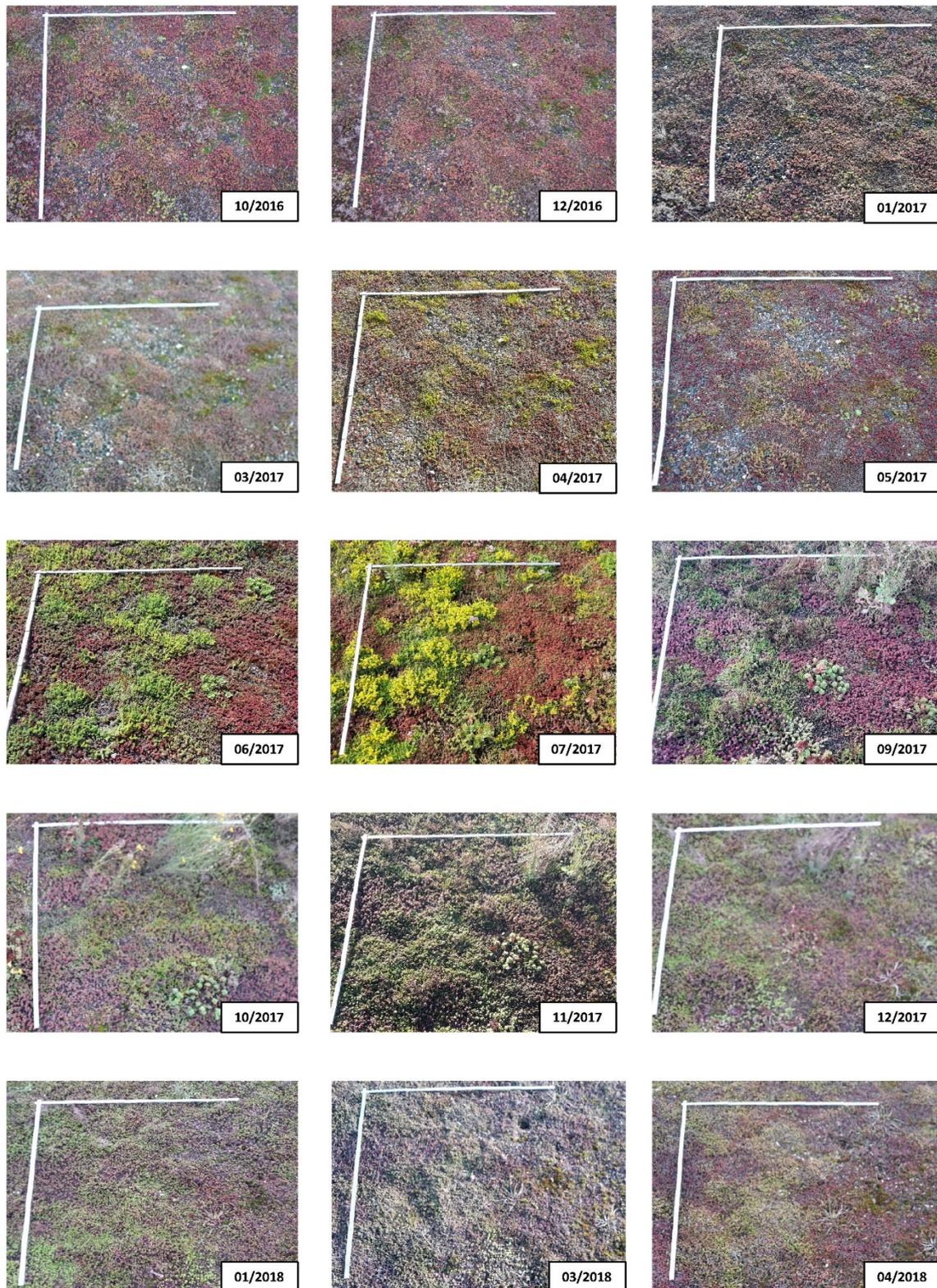


Abbildung 11: Fotodokumentation der Transekte im nord-östlichen Bereichs des Gründaches auf dem HCU Gebäude von März 2015 (oben links) bis April 2018 (unten rechts). Die Aufnahmezeitpunkte sind im jeweiligen Teilbild benannt. Es ist zu beachten, dass in einigen Monaten keine Aufnahmen zur Verfügung stehen.

Für jeden Monat wurde der Pflanzenbedeckungsgrad aus dem Mittelwert der 10 Transekte gebildet. Wie in Abbildung 10 zu erkennen ist, hat sich der Bedeckungsgrad von Beginn der Aufnahmen im März 2015 von etwa 20 % innerhalb von 3 Jahren auf nahezu 100 % entwickelt und ist seitdem etwa konstant geblieben. Am Beispiel eines Transektes ist die zeitliche Entwicklung anhand einer Fotodokumentation in Abbildung 11 dargestellt. Deutlich zu sehen ist die Entwicklung des Bedeckungsgrades und die jahreszeitlichen Veränderungen der farblichen Gestalt der Pflanzen der Extensivbegrünung. Ein Blick über die Dachbegrünung in Richtung Nord-Osten gibt einen zusätzlichen Eindruck über die flächige, relative gleichmäßig verteilte Entwicklung der Pflanzenbedeckung (Abbildung 12).



Abbildung 12: Entwicklung der Pflanzenbedeckung am Nordteil des Gründachs im Februar 2015 (Links, Bedeckungsgrad < 20%), März 2016 (mitte, Bedeckungsgrad ~ 70%) und Juni 2017 (Rechts, Bedeckungsgrad ~ 90%).

2.4.2 Gründächer RISA Pilotprojekt Am Weißenberge

Das RISA-Pilotprojekt Am Weißenberge wurde in Zusammenarbeit mit der Siedlungs-Aktiengesellschaft Hamburg und Gesellschaft für Wohnen und Bauen mbH (SAGA GWG), der damaligen Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU) Hamburg, der Zinco GmbH, der Optigrün international AG und HamburgWasser im Rahmen der Erschließung eines Wohngebietes entwickelt. Auf zwei Gebäuden wurden insgesamt 4 Teilflächen (jeweils 218 m² Fläche, davon etwa 5 % unbegrünt) und auf einem weiteren Gebäude zwei weitere Teilflächen (jeweils ca. 133 m² Fläche, davon etwa 8 % unbegrünt) mit unterschiedlichen Dachtypen ausgestattet. Auf den vier größeren Flächen wurden unterschiedliche Typen von Retentionsdächern gebaut und auf den kleineren Flächen ein Extensivgründach sowie ein unbegrüntes Kiesdach zur Vergleichsmessung. Ein Gebäude ist mit zwei verschiedenen Typen Zinco-Retentionsgründächern ausgestattet, auf einem weiteren Dach wurden zwei verschiedene Typen Retentionsgründächer der Fa. Optigrün realisiert (Abbildung 13). Die Dächer dieser Gebäude wurden als 0°-Dächer ausgeführt, um die Funktionsweise als Retentionsdächer zu gewährleisten. Auf dem dritten Gebäude wurde ein Kiesdach und ein Typ Extensivgründach (Optigrün Systemösung Spardach) zu Vergleichszwecken installiert. Zur Messung der Abflussmengen wurden auf den Zwischengeschossen Messboxen in die Abflussstränge installiert.

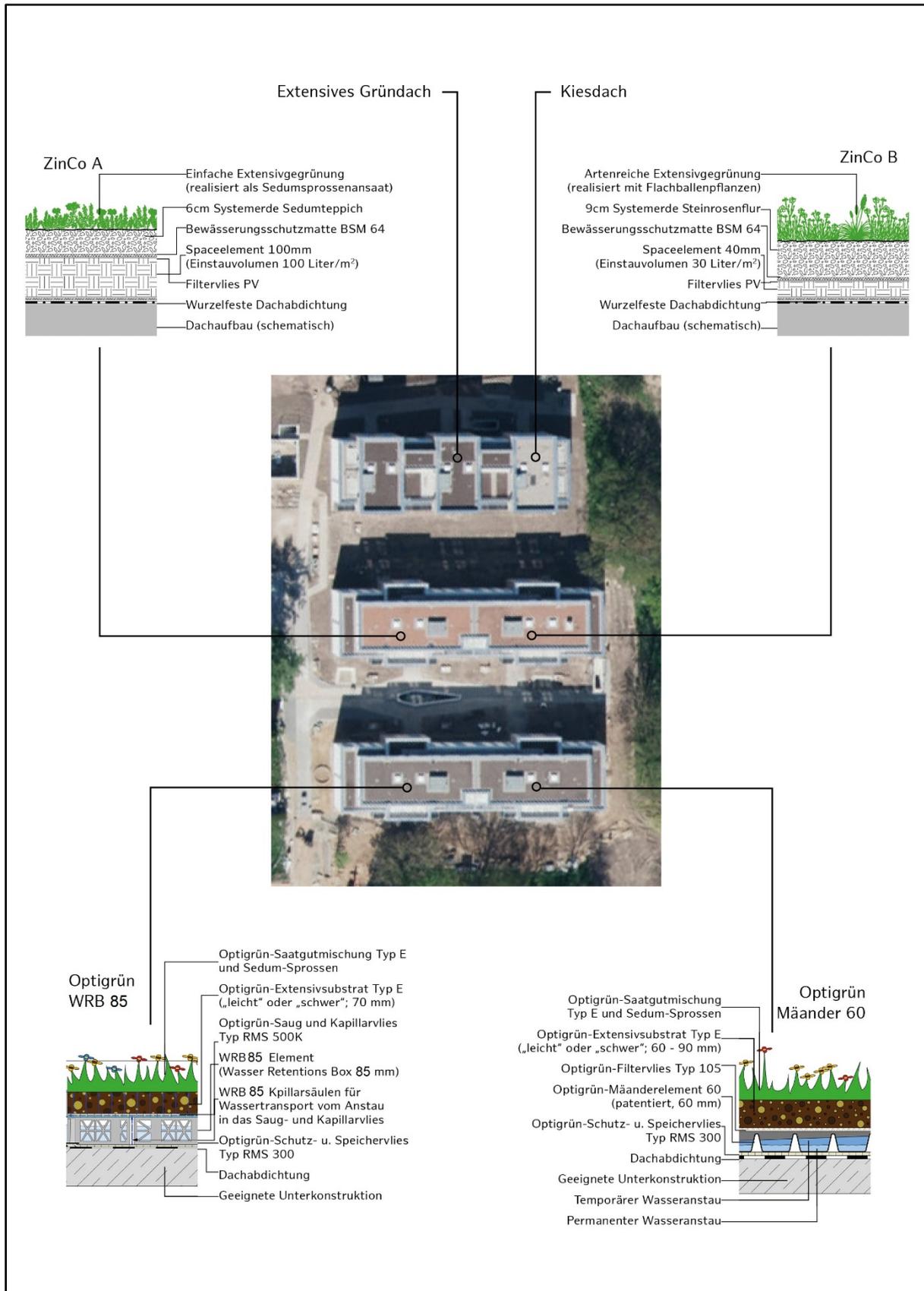


Abbildung 13: Schematische Darstellungen unterschiedlicher Gründachtypen des RISA Pilotprojekts Am Weißenberge (©Zinco GmbH und Optigrün international AG, verändert).

2.4.3 Hydrologische Messsysteme

2.4.3.1 Messsysteme HCU Gebäude

Alle Messeinrichtungen zum kontinuierlichen Monitoring der Regenwasser-Retentionsleistung des Extensivgründachs auf dem HCU Gebäude wurden nach Fertigstellung des Gebäudes und dessen Dach und Regenwasserinfrastruktur geplant und aufgebaut. Dadurch bedingt wurde ein etwa 600 m² großer Teil auf dem nordöstlichen Gebäudeteil als Einzugsgebiet für die Abflussmessung gewählt, da von diesem Bereich drei Entwässerungselemente in einem Hauptstrang zusammengeführt wurden und in diesem Strang die Abflussmessung für eine besonders große Fläche möglich war. Auf diesem Gebäudeteil wurden auch die Niederschlagsmessstationen eingerichtet (Abbildung 14).



Abbildung 14: Luftansicht des HCU-Gebäudes mit Dachbegrünung (oben links, © HCU), schematische Skizze der Zusammenführung der Abflusstränge und zusammenführung in Messsystem im EG (oben rechts), Dachaufsicht HCU-Gebäude mit Standorten der Niederschlagsmesser (rote Punkte) und Einzugsgebiet zur Dachabflussmessung (schattiert) (© fairplants-system GmbH, T. Brinkmann, bearbeitet).

Im März 2015 wurden die Messeinrichtungen zur Niederschlags- und Abflussmessung aufgebaut. Auf dem Dach wurden Niederschlagssensoren mit Kippzählern nach dem Prinzip des Hellmann-Regenmessers angebracht. Der Wippeninhalt der beiden Kippzähler beträgt 2 cm^3 (2 g) und 4 cm^3 (4 g) Wasser. Bezogen auf die Auffangfläche von 200 cm^2 entspricht eine Wippenfüllung der Niederschlagshöhe von 0.1 mm bzw. 0.2 mm pro Quadratmeter gemäß der World Meteorological Organization (WMO)-Norm. Der zweite Sensor mit der Auflösung von 0,2 mm wurde im Jahr 2016 installiert. Die gemessenen Daten werden in 1-minütigen Intervallen und mittels EASYLOG 40IMP Datenlogger gespeichert. Der Abfluss vom Gründach wird von einer Teilfläche gemessen, die in drei Dachabläufe entwässert, welche in einem Abflusstrang abgeführt werden. Die Fläche, die in diesen Strang entwässert, beträgt insgesamt 598 m^2 , wovon etwa 130 m^2 (22 % der Fläche) nicht begrünt sind. Dieser Dachriegel besitzt ein Blechdach und entwässert über Abflussrohre direkt in den Kiesstreifen des Gründaches. Die Fläche des entwässernden Gründachs beträgt 468 m^2 , diese Fläche beinhaltet 9 m^2 (2 %) zusätzliche technische Dachaufbauten ohne unterliegendes Substrat. Diese entwässert nur teilweise über das Gründach. Im Erdgeschoss des Gebäudes wurde eine Messbox angebracht, die in den Abflusstrang der drei Dachabläufe eingebunden wurde. Die Messbox misst den Durchfluss mittels zweier Messprinzipien: Kleinere Abflüsse bis zu einem Volumenstrom von 5 l/min können mit dem 100 ml Kippzähler gemessen werden (Hersteller Fa. Umweltgerätetechnik GmbH (UGT)), für größere Durchflüsse wird parallel die Stauhöhe h in einem Thompson-Messwehr mittels Pegelmesseinrichtung mit Druckwandler gemessen und so der aktuelle Durchfluss über eine Abflussformel (nach Strickland und Barr) berechnet (Abbildung 15 und Abbildung 16):

$$Q = 2,363 * \mu * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) * h^{2,5}$$

Mit

$$\mu = 0,565 + \frac{0,0087}{h^{0,5}}$$

Q Durchfluss am Messwehr [m^3/s]

h Stauhöhe im Messwehr [m]

α Öffnungswinkel des Messwehrs [rad]

Die Aufzeichnung der Messwerte für den Abfluss erfolgt ebenfalls in 1-minütigen Intervallen und wird mittels UGT-Datenlogger DL200 aufgezeichnet.



Abbildung 15: Niederschlagssensor mit Datenlogger (oben links), Messbox mit Datenlogger im EG (oben rechts), innerer Aufbau der Messbox mit V-Wehr und Kippzähler (unten).

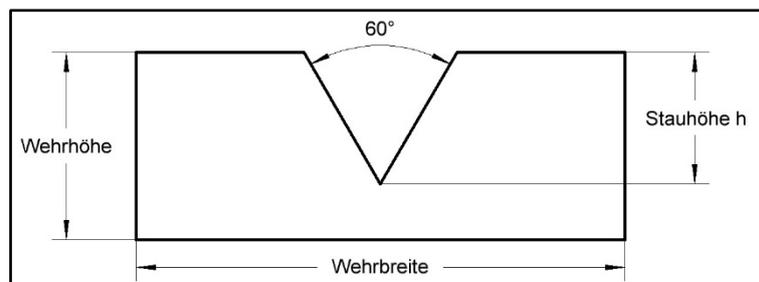


Abbildung 16: Prinzip der Messung von Durchflüssen an einem Thompson-Messwehr (UGT 2015).

2.4.3.2 Messsysteme RISA Pilotprojekt Am Weißenberge

Die hydrologische Messtechnik am Standort „Am Weißenberge“ wurde im März und Juni 2016 eingebaut. Abflussmessungen der Retentionsdächer auf den Gebäuden 1 und 2 (Abbildung 17a) erfolgen über in Messboxen verbaute 1 l Kippzähler (Abbildung 17c). Die Messboxen auf Gebäude 3, die die Abflüsse vom Extensiv- und Kiesdach messen, nehmen Durchflussdaten über ein duales System ähnlich dem am HCU-Gebäude sowohl mittels Kippzähler als auch über Pegelmessung an einem Wehrüberlauf

auf (Abbildung 17d). Zusätzlich wurde auf Haus 3 ein HELLMANN-Regenmesser (Abbildung 17e) mit integriertem Kippzähler installiert, um den Abflüssen punktgenaue Niederschlagsdaten zuordnen zu können.

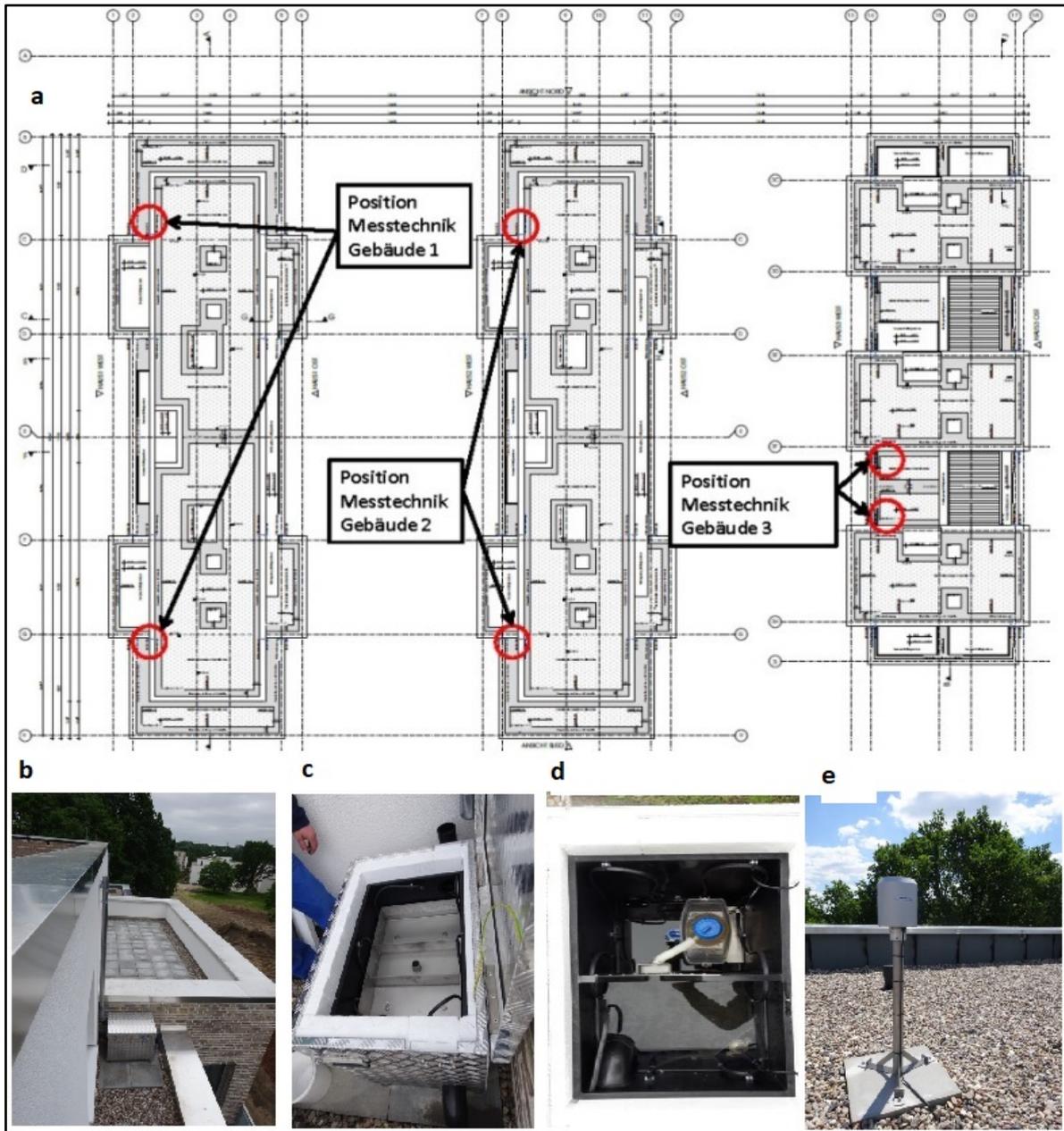


Abbildung 17: Platzierungsplan der Messboxen zur Abflussmessung (a) auf Haus 1 bis 3 (v.l.n.r.) (verändert nach A-Quadrat Architekten + Ingenieure GmbH), Messbox an Gebäude 1 mit Kippzählertechnik (b, c) und dualem Messsystem (d) und Regenmesser nach HELLMANN (e).

2.4.4 Datenaufbereitung und -auswertung

Die Daten der **Niederschlagsmessungen** wurden unkorrigiert in die Analyse übernommen. Es wurden regelmäßige Prüfungen durchgeführt, bei denen die Plausibilität der täglichen, monatlichen und jährlichen Niederschlagssummen mit denen anderer, naheliegender Stationen des Deutschen Wetterdienst (DWD) (HH-Fuhlsbüttel) und des Luftmessnetzes Hamburg (Station Marckmannstraße) verglichen wurden, wobei keinerlei systematische Fehler im Datensatz auffielen. Ebenfalls gab es keine systematischen Unterschiede zwischen den Messungen der zwei auf dem Dach befindlichen Sensoren, die ebenfalls untereinander verglichen wurden. Im Allgemeinen wurden zur Analyse nur die Daten des höher auflösenden Niederschlagssensors (0,1 mm) verwendet. Wenn es zur Überschreitung des Messbereichs dieses Sensors kam, wurden stattdessen die Daten des zweiten Sensors genutzt. Als zu analysierende Durchflussdaten aus der Messbox wurden bei geringer Durchflussmenge (Höhe des Wehrüberlaufs < 13 mm) aufgrund der höheren Genauigkeit die Daten des Kippzählers verwendet. Bei höheren Wehrüberläufen wurden die Durchflüsse nach der Formel nach Strickland und Barr aus der Überlaufhöhe im Wehr berechnet. Analog dazu wurde mit Daten des Projekts Am Weißenberge verfahren, wobei nur ein Regenmesser vorhanden war und bei dessen Ausfall auf Daten der nahegelegenen DWD-Station am Flughafen Fuhlsbüttel zurückgegriffen wurde.

Um einzelne Regenereignisse aus dem Datensatz zu generieren, ist es von großer Bedeutung, die sog. Inter-event time sinnvoll zu bestimmen (Joo et al. 2014). Die inter-event time ist definiert als Zeit zwischen zwei Regenereignissen, d.h. als Mindest-Zeitspanne, in der kein Niederschlag fällt, um zwei Regenereignisse als voneinander getrennt aufzufassen. Diese Zeitspanne wird je nach Bezugssystem definiert. Sie hängt maßgeblich von der Zeit ab, die das jeweilige System zur Entwässerung benötigt.

Regenereignisse wurden in den gemessenen Datensätzen als voneinander getrennt definiert, wenn zwischen ihnen eine mindestens 6 Stunden lange Trockenphase ohne gemessenen Niederschlag lag. Diese Zeitspanne wurde in verschiedenen Studien als eine für Dachbegrünungen sinnvolle inter-event-time angesehen (Burszta-Adamiak et al. 2019; Carson et al. 2013; Carson et al. 2017; Fassman-Beck et al. 2013; Getter et al. 2007; Hakimdavar et al. 2014; Speak et al. 2013a; Stovin et al. 2012; van Woert et al. 2005). Für jedes Regenereignis wurde die Regenmenge und -dauer, die mittlere und maximale Intensität und die vorhergehende Trockenperiode (ADWP) aufgenommen.

Als **zusätzliche meteorologische Variablen** wurden von der Hamburger Luftmessnetzstation Marckmannstraße Tagesmittelwerte der Temperatur [°C], der relativen Luftfeuchte [%], der Windgeschwindigkeit [m/s], der Windrichtung [°] und die Tagessumme der Globalstrahlung [Wh/m²] in die Analysen

aufgenommen. Die Daten sind verfügbar unter <https://luft.hamburg.de/>. Zusätzlich zu den Tageswerten wurden, um auch langfristige meteorologische Effekte mit einzubeziehen, die jeweiligen Mittelwerte der vorangegangenen 3 Tage und 7 Tage gebildet.

Abflussdaten, also mm oder l pro Zeiteinheit, wurden ebenfalls in 1-minütigen Zeitschritten aufgezeichnet, um detaillierte Vergleiche von Regen und Abfluss gewährleisten zu können. Tage an denen die Tagesmitteltemperatur unter 0 °C lag, also mit Frost zu rechnen war, wurden nicht in die Analyse von Einzelereignissen aufgenommen, da sich einerseits die Messgenauigkeit der Niederschlagsmengen bei Schnee verringert und andererseits durch temporäres Gefrieren des Wassers auf dem Dach und späteres Abschmelzen nicht genau sagen lässt, welchen Niederschlagsereignissen welche Abflüsse zuzuordnen sind. Die Niederschlags- und Abflussdaten des RISA-Projekts Am Weißenberge wurden analog aufgezeichnet und bearbeitet.

Die **Retention** bzw. der Rückhalt von Niederschlägen auf den Dachbegrünungen wurde über verschiedene Zeitintervalle wie Jahreszeiten, Monate oder auch einzelne Regenereignisse (Minuten bis Stunden) analysiert. Die für die wasserwirtschaftliche Praxis bezüglich Bemessungsaufgaben und Überflutungsvorsorge relevante Wirkung von Dachbegrünungen, der Rückhalt von (Stark)regenereignissen, vergleichbar mit dem Abflussbeiwert Ψ_M (Quotient aus Gesamtabflussvolumen und Gesamtregensmenge), wurde anhand einzelner, gemessener Niederschlags- und Abflussereignisse bewertet. Weiterhin wurden die Parameter „prozentualer Regenwasserrückhalt“ [%] und „Spitzenabflussbeiwert Ψ_S “ (Quotient aus maximaler Abflusspende und maximaler Regenspende) herangezogen. Weiterhin waren für die Analysen in dieser Arbeit die Verzögerung des Abflussbeginns [min] und die Verzögerung des Spitzenabflusses im Gegensatz zur maximalen Regenintensität [min] interessant.

2.5 Diagnostische Gleichung

Basierend auf den erhobenen empirischen Daten wird eine diagnostische Gleichung zur Bestimmung des Regenwasserrückhalts in Gründächern aufgestellt, um die Beziehungen zwischen den abflussbestimmenden Zustandsgrößen anhand empirischer Beobachtungen physikalisch zu beschreiben. Solche Gleichungen dienen bei unterschiedlichen Fragestellungen zur vereinfachten, modellhaften Beschreibung unterschiedlicher Umwelt-Phänomene. Theeuwes et al. (2017) konnten beispielsweise mittels Dimensionsanalyse meteorologischer Parameter die Ausprägung der maximalen Intensität des UHI-Phänomens in Städten Nordwesteuropas zeigen. Solche vereinfachten, auch für Praktiker:innen anwendbaren Modelle oder Tools sind nach Stovin et al. (2012) u.a. aus ingenieurtechnischer Sicht auch

im Regenwassermanagement von Nöten, um die Wirksamkeit von Maßnahmen bei gegebenen Regenmengen abschätzen zu können. Für diese Arbeit wurde die Methode der multiplen linearen Regression zur Erstellung eines einfachen Vorhersagemodells gewählt, um einerseits die Wirksamkeit von Dachbegrünungen hinsichtlich ihres Regenwasserrückhalts abzuschätzen. Andererseits ist es mit dieser Methode möglich, diejenigen Parameter statistisch zu identifizieren, die den größten Einfluss auf die hydrologische Effizienz der untersuchten Dachbegrünungen haben. Anhand einer multiplen linearen Regression ist es möglich, die Korrelationen zwischen zwei oder mehreren unabhängigen Variablen (meteorologische Parameter wie ADWP, Regenmenge, Temperaturen, Luftfeuchte,...) und einer abhängigen Variable (Regenwasserrückhalt) zu bestimmen. Wobei der Regenwasserrückhalt hier für unterschiedliche Ausprägungen bzw. Variablen steht (Abflussmenge, prozentualer Regenwasserrückhalt,...), welche mit diesem statistischen Verfahren auf die Eignung als abhängige Variable im Vorhersagemodell geprüft wurden. Es sollte außerdem festgestellt werden, ob die Regressionsanalyse ein robustes Vorhersagetool für den Regenwasserabfluss von Dachbegrünungen sein kann. Die Gleichung zur Beschreibung des linearen Zusammenhangs bzw. für das Regressionsmodell ist folgende:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n + \varepsilon$$

Y vorhergesagter bzw. erwarteter Wert für die abhängige Variable (Regenwasserrückhalt)

a₀ Wert für y, wenn alle unabhängigen Variablen (x) den Wert 0 annehmen

x_{1,2,3,...,n} unabhängige Variablen, die zur Vorhersage herangezogen werden

ε Residuum, beschreibt den Fehler in der Vorhersagegenauigkeit, wird berechnet aus dem vertikalen Abstand zwischen gemessenem Datenpunkt und der berechneten Regressionsgeraden

Wie schon in Kapitel 2.3.2, Tabelle 4 beschrieben wurde, stellt die Regressionsgleichung eine Funktion dar, wobei a₀ den Schnittpunkt der Geraden mit der y-Achse beschreibt. Die Ausgleichsgerade zwischen den Größen stellt durch die Methode der kleinsten Quadrate und die damit einhergehende Minimierung der Residuen (rote Linien in Abbildung 18) eine möglichst gute Anpassung an alle gemessenen Werte dar. Als Residuum wird der Wert ε bezeichnet, der die Vorhersageungenauigkeit beschreibt. Bei der Interpretation der Regressionsanalyse wird der quadratische Wert des Korrelationskoeffizienten herangezogen, das sog. Bestimmtheitsmaß (R²). Je näher dieser Wert an 1 bzw. -1 liegt, desto robuster ist das Regressionsmodell. Bei einem Wert von 1 oder -1 würden alle Punkte exakt auf der Regressionsgeraden liegen, also die Residuen 0 werden. Die Signifikanz des Bestimmtheitsmaßes wurde mittels t-test mit einem p-Wert von 0,05 überprüft. Im Rahmen dieser Regressions-Analyse mit der

SPSS Software (IBM SPSS statistics Version 25) wurden so auch nicht signifikante Variablen, die nicht zur Vorhersagegenauigkeit beitragen, ausgeschlossen. Mit Hilfe der Methode der schrittweisen multiplen linearen Regression wurde das Regressionsmodell nacheinander um eine unabhängige Variable erweitert, die das R^2 am meisten vergrößert. Wenn das Hinzufügen von Variablen keinen signifikanten Anstieg von R^2 mehr zur Folge hat, wird das Verfahren abgebrochen und es werden keine weiteren Variablen mehr zum Modell hinzugefügt.

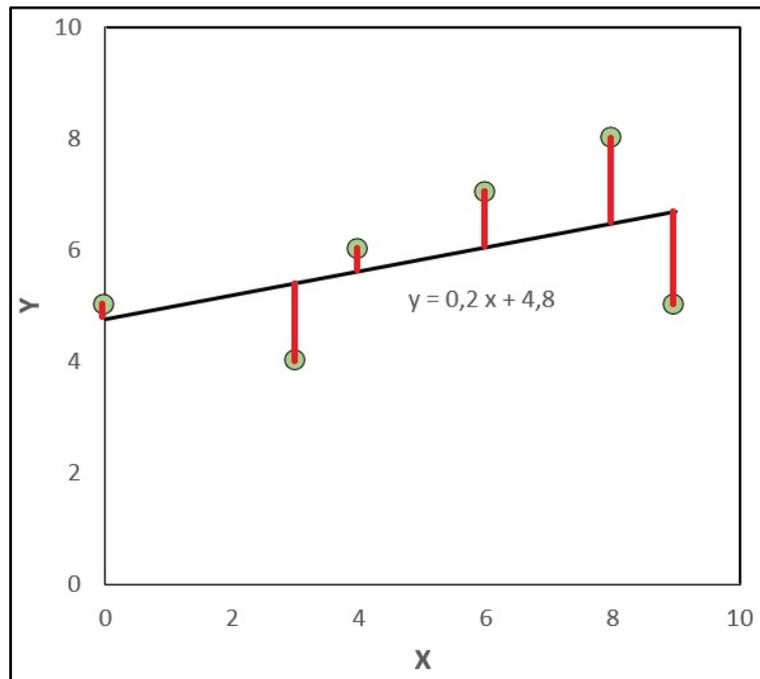


Abbildung 18: Schematische Darstellung einer Regressionsgerade für fiktive Messwerte von X und Y. Die roten Linien stellen den Abstand der gemessenen Werte zur Ausgleichsgeraden dar („Residuen“).

Die Erstellung des Regressionsmodells wurde für die Datensätze aus der Meta-Analyse und die Messungen am Standort „HCU-Dach“ durchgeführt. Die berechnete Gleichung soll anhand der gemessenen Daten validiert werden.

3. Quantifizierung der Klimafolgenanpassungsleistungen von Dachbegrünungen

Durch das systematische Reviewverfahren konnten insgesamt 123 Studien aus den Jahren 1987 bis 2019 bezüglich Dachbegrünungen zur quantitativen Analyse ausgewählt werden. Das Auswahlverfahren ist schematisch in Abbildung 19 dargestellt. Studien, die nach 2019 veröffentlicht wurden, konnten in dieser Analyse nicht betrachtet werden, da das Arbeitspaket des systematischen Reviews bzw. der Datenbankrecherche bis Ende 2019 abgeschlossen wurde. Zunächst wurde das Reviewverfahren thematisch weiter gefasst, da auch nach Studien zu Fassadenbegrünungen und deren Effekten bezüglich Klimawandelauswirkungen gesucht wurde. Aufgrund der thematischen Zuspitzung dieser Arbeit wurden jedoch nur Studien aus dem Bereich Dachbegrünung im Rahmen einer quantitativen Analyse bearbeitet. Die folgenden Ausführungen beziehen sich jedoch zunächst auf die Gesamtanzahl der Studien.

Zu den 675 Artikeln, die durch die Schlagwortsuche als Treffer in den Datenbanken auftraten, wurden 99 weitere Artikel hinzugefügt, die dem Autor bereits bekannt waren oder sich in den Literaturlisten der Datenbank-Artikel befanden. Aus diesen 774 Artikeln wurden Doppelgänger entfernt und die Titel und (wenn vorhanden) Zusammenfassungen auf thematische Relevanz bezüglich der Forschungsfrage analysiert. Dabei wurden 499 Artikel aussortiert, sodass letztendlich 275 Artikel in Gänze untersucht bzw. gelesen wurden. Einige Artikel waren nicht in deutscher oder englischer Sprache verfasst und einige waren nicht verfügbar. Außerdem wurden in dieser Phase Artikel aussortiert, die methodisch nicht zur Datenextraktion geeignet waren oder die bspw. für diese Untersuchung nur nicht relevante Parameter untersucht haben. So wurde bspw. eine Vielzahl von Artikeln zu diesem Zeitpunkt aussortiert, die sich mit dem thermischen Verhalten von Fassadenbegrünungen befassten, sich aber ausschließlich auf Oberflächen- oder Innenraumtemperaturen bezogen. Damit wichen sie stark vom Ziel der vorliegenden Untersuchung, den Effekt von Gebäudebegrünungen auf die Umgebungstemperaturen zu untersuchen, ab. Durch die spätere thematische Fokussierung auf Dachbegrünungen wurden 123 Artikel vollständig analysiert und vorhandene Daten wurden in die Review-Datenbank übertragen.

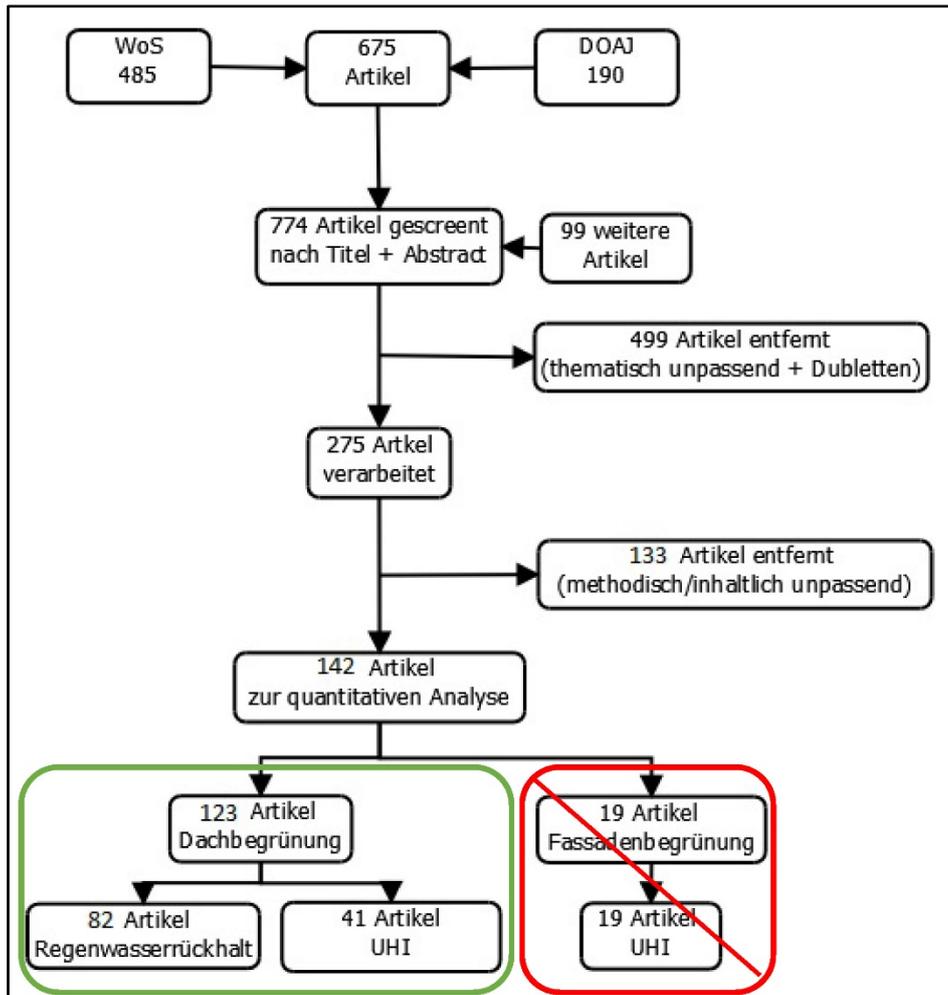


Abbildung 19: Schematische Vorgehensweise bei der Auswahl der zur Quantifizierung in die Datenbank übertragenen Studien (WoS = Web of Science, DOAJ = Directory of Open Access Journals).

Auffällig war, dass eine deutliche Mehrheit der Studien Untersuchungen zu Dachbegrünungen erforschte. Das bedingte u.a. auch die spätere thematische Fokussierung. Von den 123 relevanten Studien thematisierten 82 den Effekt des Regenwasserrückhalts durch Dachbegrünungen und 41 Studien thematisierten die Beeinflussung der städtischen Wärmeinseln. Eine Auflistung der in die Datenbank übertragenen Studien befindet sich in Anhang 7. Die für diese Untersuchung als relevant eingestuft Aspekte der untersuchten Studien, welche in die Review-Datenbank übertragen wurden, wurden bereits in Kapitel 2.2.2 und speziell in Tabelle 3 dargelegt. Das folgende Diagramm (Abbildung 20) kategorisiert diese noch einmal thematisch.

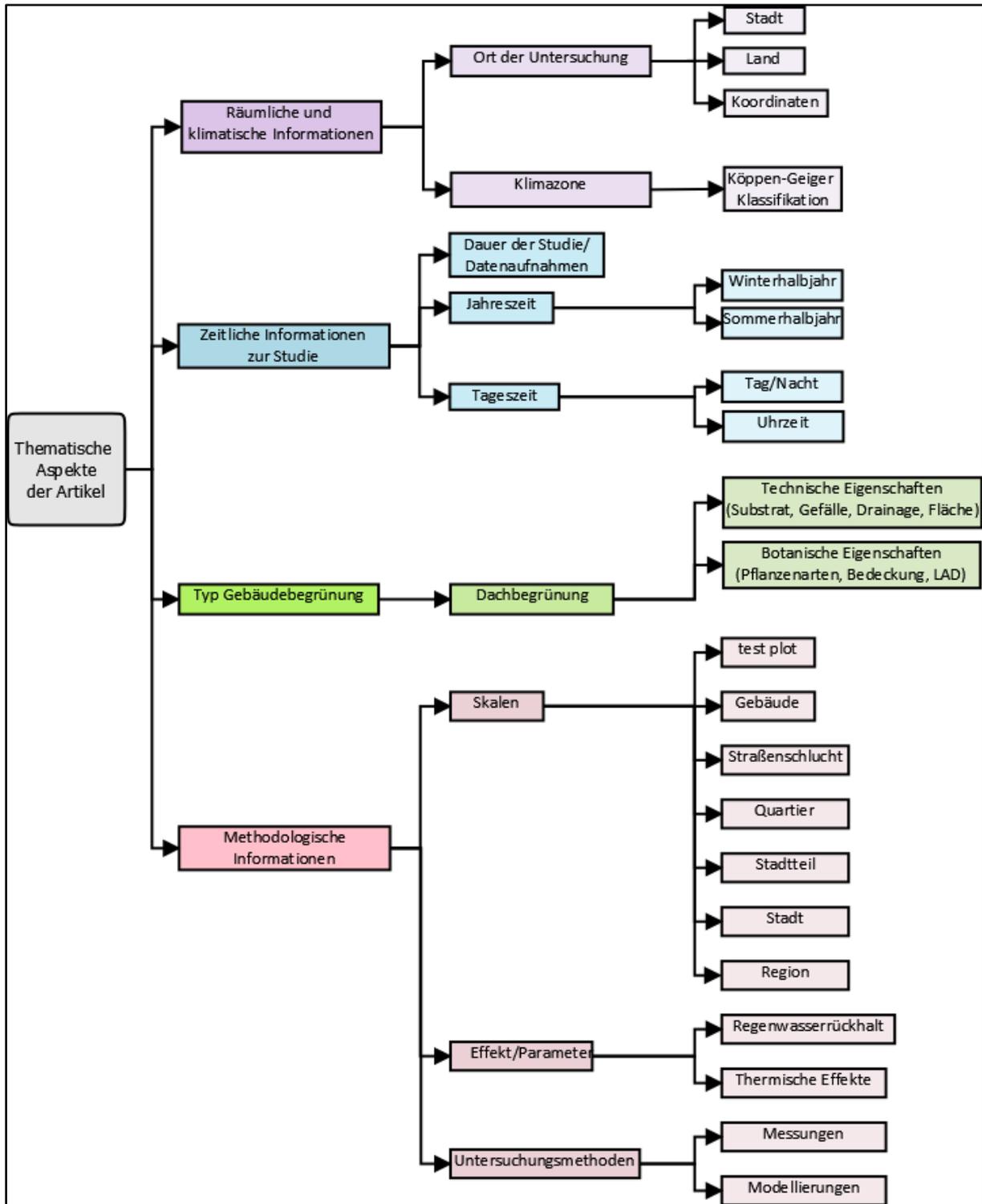


Abbildung 20: Thematische und methodische Aspekte der in die Review-Datenbank übertragenen Studieninhalte. Die Kategorien der thematischen Aspekte sind mit farblichen Hintergründe zur besseren Unterscheidung dargestellt.

3.1 Internationale Forschung zu klimafolgenanpassungs-relevanten Effekten von Dachbegrünungen

Die folgenden Ausführungen und Analysen beziehen sich auf die in die Review-Datenbank übertragene Studien, deren thematische Schwerpunkte und geografischen Gegebenheiten. Die Anzahl der hier dargestellten Studien ist größer als die in die Datenbank übertragenen Artikel ($N = 123$), da innerhalb einiger Artikel Untersuchungen in mehreren unterschiedlichen Städten und Ländern durchgeführt wurden. Diese wurden jeweils als einzelne Studie gezählt ($N = 128$). Anhand der folgenden Abbildung ist deutlich zu sehen, dass der geographische Schwerpunkt der Untersuchungen in Mitteleuropa und Nordamerika liegt, wobei insbesondere aus China in den letzten Jahren eine Vielzahl an Artikeln zum Thema veröffentlicht wurde. Aus den Ländern USA (38), Deutschland (19) und China (13) stammen mit 70 Studien mehr als die Hälfte aller zur Quantifizierung herangezogenen Untersuchungen (Abbildung 21).

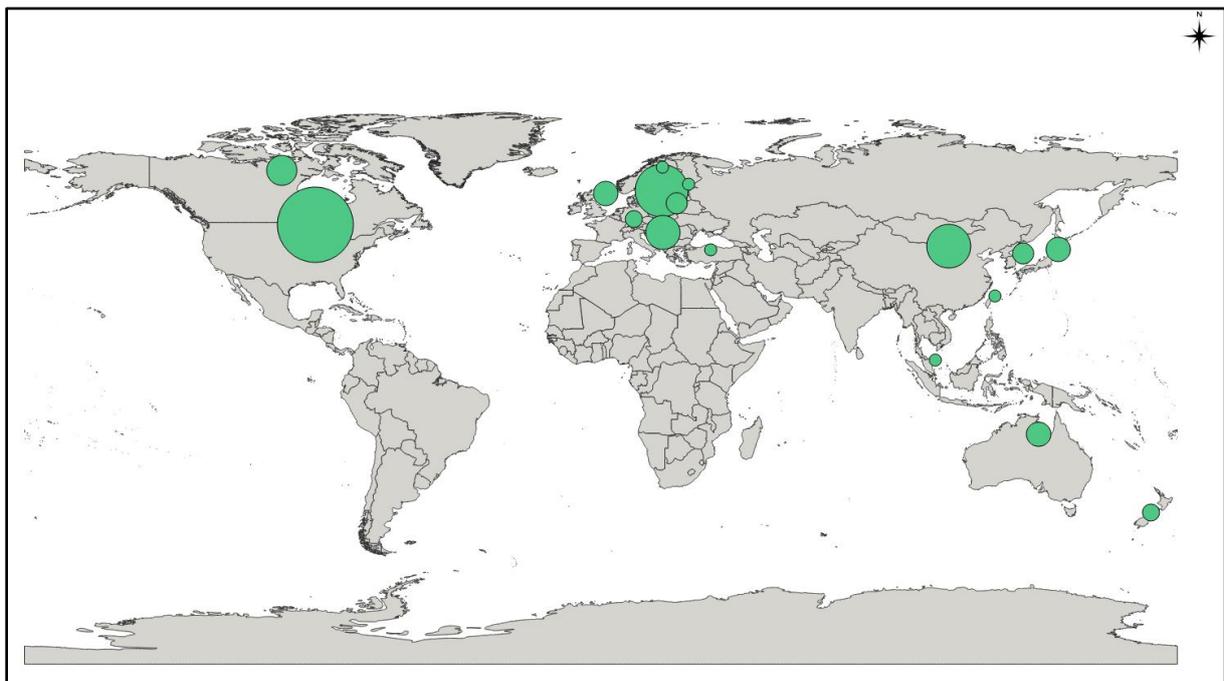


Abbildung 21: Geographische Verteilung der zur quantitativen Auswertung genutzten Studien, die Größe der Kreise entspricht der Anzahl an Studien pro Land (Hintergrundkarte © www.igismap.com).

Die geografische Verteilung der Studien, sortiert nach ihrem thematischen Fokus (Regenwasserrückhalt oder städtischer Wärmeinseleffekt), zeigt ein diverseres Bild (Abbildung 22). Auffällig ist, dass nahezu alle Studien zum Regenwasserrückhalt aus Nordamerika und Mittel- bzw. Nordeuropa stammen (blaue Kreise). Nur vereinzelt waren dazu Ergebnisse aus Südamerika (Chile, $n=1$), Asien (China, $n=4$; Südkorea, $n=2$; Singapur, Malaysia; Taiwan; Japan, Türkei jeweils $n=1$) und Ozeanien (Neuseeland, $n=2$;

Australien, n=1) verfügbar. Weiterhin fällt auf, dass Studien zur Beeinflussung des UHI-Effekts durch Dachbegrünung im asiatischen Raum vergleichsweise häufig durchgeführt wurden (rote Kreise).

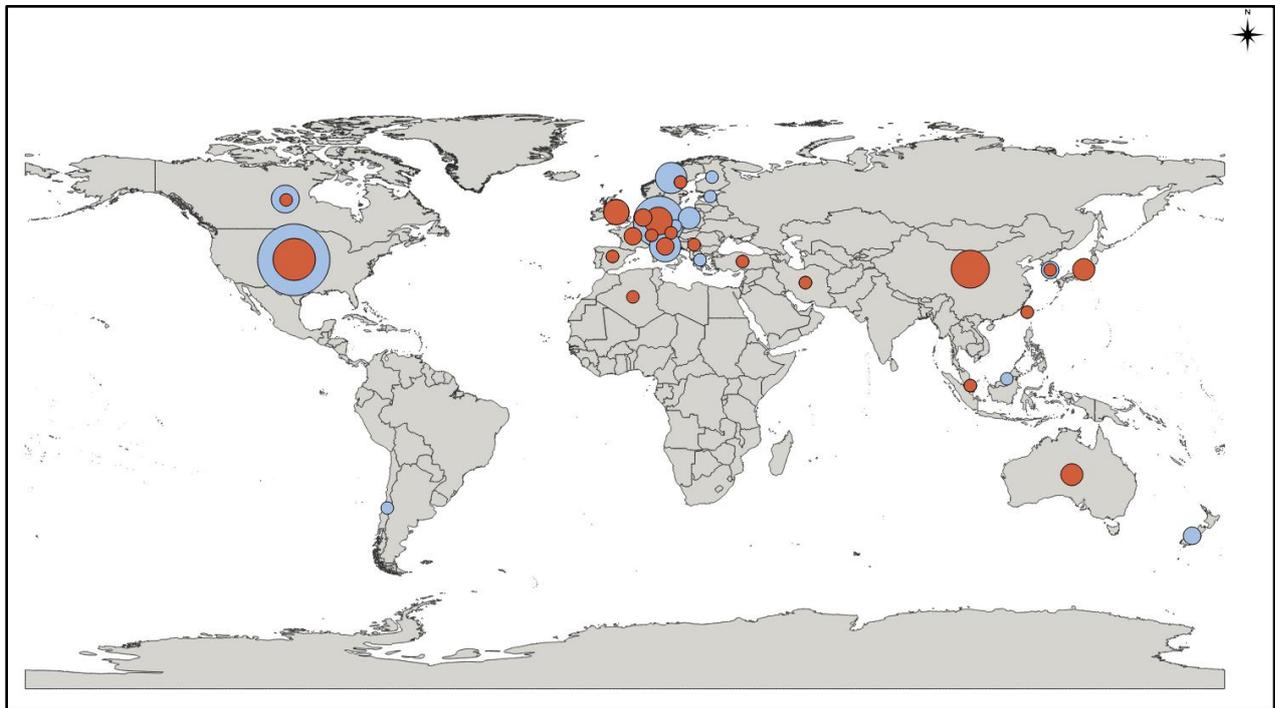


Abbildung 22: Geographische Verteilung der zur quantitativen Auswertung genutzten Studien, die Größe der Kreise entspricht der Anzahl an Studien pro Land. Aufteilung der Anzahl der Studien nach Effekttyp. Blau: Dachbegrünung – Regenwasserrückhalt, Rot: Dachbegrünung – UHI-Effekt (hintergrundkarte © www.igismap.com).

Bezüglich der Veröffentlichungszeiträume der untersuchten Studien bzw. Artikel zeigte sich ein deutlicher Anstieg von Veröffentlichungen über die vergangenen drei Jahrzehnte (Abbildung 23). Bis zur Jahrtausendwende wurden nur sehr wenige veröffentlichte Studien identifiziert. Diese stammen hauptsächlich aus dem deutschsprachigen Raum. Erst nach dem Jahr 2000 scheint das Thema Gebäudebegrünung häufiger auch international beforscht worden zu sein.

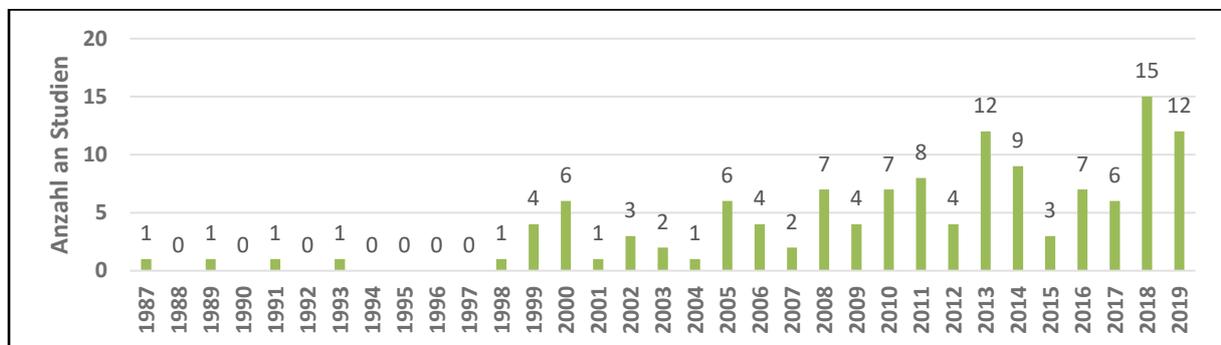


Abbildung 23: Anzahl an Studien pro Jahr (Veröffentlichungsdatum).

Die Häufung der Studien aus Mitteleuropa, den USA und China spiegeln sich auch in der Verteilung der Studien in unterschiedlichen klimatischen Zonen nach der Köppen-Geiger-Klassifikation wider (Abbildung 24 und Abbildung 25).

Die Köppen-Geiger-Klassifikation, mit der die klimatischen Bedingungen der Dachbegrünungen beschrieben wurden, ist die global am weitesten verbreitete Klimaklassifikation (Akther et al. 2018). Dabei werden Klimazonen anhand ihrer jährlichen und monatlichen Durchschnittstemperaturen und -niederschläge in fünf Hauptgruppen eingeteilt: A (tropisch), B (trocken-arid und semi-arid), C (gemäßigt), D (kontinental) und E (polar). Die Gruppen werden weiter in Niederschlags- und Temperaturgruppen unterteilt, z.B. bedeutet das hiesige Cfb-Klima „warm temperate“ (warmgemäßigt), „fully humid“ (vollständig humid) und „warm summer“ (warme Sommer), siehe auch Abbildung 24. Mehr Details zur Klimaklassifikation können z.B. Kottek et al. (2006) entnommen werden. Tabelle 6 legt detaillierte Informationen zu den unterschiedlichen Klima-haupt- und -untergruppen und deren jeweilige Anzahl der übertragenen Studien dar.

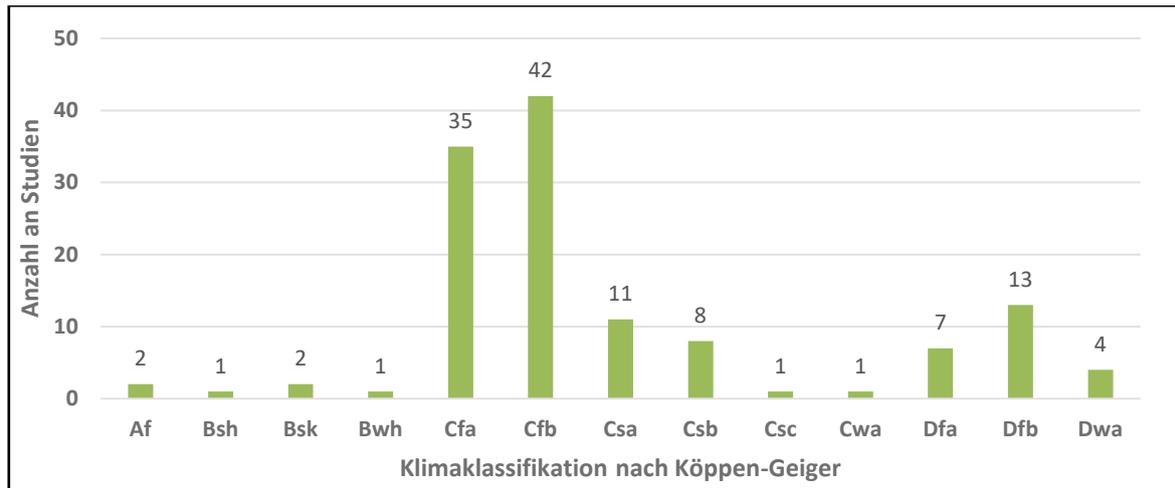


Abbildung 25: Anzahl an Studien in verschiedenen klimatischen Räumen, klassifiziert nach Köppen-Geiger.

Tabelle 6: Charakteristiken der Klimahaupt- und Untergruppen nach der Koppen-Geiger Klimaklassifikation c mit der Anzahl der in den jeweiligen Gruppen durchgeführten Untersuchungen bzw. Studien zur Klimafolgenanpassungsleistung von Dachbegrünungen. Zur Erklärung der Abkürzungen: T_{ann} = Jahresdurchschnittstemperatur in 2m über N.N.; T_{min} = Monatsmitteltemperatur des kältesten Monats im Jahr; T_{max} = Monatsmitteltemperatur des wärmsten Monats des Jahres; T_{mon} = Monatsmitteltemperatur; P_{ann} = Jahresniederschlagssumme; P_{min} = Niederschlagssumme des trockensten Monats des Jahres; P_{th} = ein trockenheitsgrenzwert in mm, ist abhängig von T_{ann} und der jährlichen Niederschlagsverteilung; P_{smin} = geringste Monatsniederschlagssumme des trockensten Sommermonats; P_{wmin} = geringste Monatsniederschlagssumme des trockensten Wintermonats; P_{wmax} = höchste Monatsniederschlagssumme des feuchtesten Wintermonats (Auswertung nach (Akther et al. 2018)).

Klimahauptgruppe	Beschreibung	Charakteristik	Anzahl Studien zur Hydrologie von Dachbegrünungen	Anzahl Studien zur UHI Beeinflussung von Dachbegrünungen
Gruppe A	Äquatoriale Klimate (tropisch)	$T_{min} \geq +18^{\circ}\text{C}$	2	-
Af	Äquatorialer Regenwald, vollständig humid	$P_{min} \geq 60\text{mm}$	2	-
Aw	Äquatoriale Savanne (trockene Winter)	$P_{min} < 60\text{mm}$ im Winter	-	-
Gruppe B	Aride Klimate	$P_{ann} < 10 P_{th}$	2	2
Bsh	Heißes Steppenklimate	$P_{ann} > 5 P_{th}$; $T_{ann} \geq +18^{\circ}\text{C}$	1	-
Bsk	Kaltes Steppenklimate (kalt semiarid)	$P_{ann} > 5 P_{th}$; $T_{ann} < +18^{\circ}\text{C}$	1	1

QUANTIFIZIERUNG DER KLIMAFOLGENANPASSUNGSLEISTUNGEN VON DACHBEGRÜNUNGEN

Bwh	Heißes Wüstenklima	$P_{ann} \leq 5 P_{th}; T_{ann} \geq +18^{\circ}\text{C}$	-	1
Gruppe C	Warm gemäßigte Klimate	$-3^{\circ}\text{C} < T_{min} < +18^{\circ}\text{C}$	72	37
Cfa	Warm gemäßigte Klimate, vollständig humid (heiße Sommer)	$P_{smin} = P_{wmin}; P_{wmax} \leq 3 P_{smin}; P_{smin} \geq 40 \text{ mm}; P_{smax} \leq 10 P_{wmin}; T_{max} \geq +22^{\circ}\text{C}$	21	18
Cfb	Warm gemäßigte Klimate, vollständig humid (warme Sommer)	$P_{smin} = P_{wmin}; P_{wmax} \leq 3 P_{smin}; P_{smin} \geq 40 \text{ mm}; P_{smax} \leq 10 P_{wmin}; T_{max} < +22^{\circ}\text{C}; \text{mindestens } 4 T_{mon} \geq +10^{\circ}\text{C}$	31	14
Csa	Warm gemäßigte Klimate, trockene Sommer (heiße Sommer)	$P_{smin} < P_{wmin}; P_{wmax} > 3 P_{smin}; P_{smin} < 40 \text{ mm}; P_{smax} \leq 10 P_{wmin}; T_{max} \geq +22^{\circ}\text{C}$	7	3
Csb	Warm gemäßigte Klimate, trockene Sommer (warme Sommer)	$P_{smin} < P_{wmin}; P_{wmax} > 3 P_{smin}; P_{smin} < 40 \text{ mm}; P_{smax} \leq 10 P_{wmin}; T_{max} < +22^{\circ}\text{C}; \text{mindestens } 4 T_{mon} \geq +10^{\circ}\text{C}$	7	1
Csc	Warm gemäßigte Klimate, trockene Sommer (kalte Sommer und Winter)	$P_{smin} < P_{wmin}; P_{wmax} > 3 P_{smin}; P_{smin} < 40 \text{ mm}; P_{smax} \leq 10 P_{wmin}; T_{min} > -38^{\circ}\text{C}; \text{höchstens } 4 T_{mon} \geq +10^{\circ}\text{C}$	1	1
Cwa	Warm gemäßigte Klimate, trockene Winter (heiße Sommer)	$P_{wmin} < P_{smin} \text{ and } P_{smax} > 10 P_{wmin}; T_{max} \geq +22^{\circ}\text{C}$	-	-
Gruppe D	Schneeklimate (kontinental)	$T_{min} \leq -3^{\circ}\text{C}$	19	5
Dfa	Schneeklima, vollständig humid (heiße Sommer)	$P_{smin} = P_{wmin}; T_{max} \geq +22^{\circ}\text{C}$	5	2
Dfb	Schneeklima, vollständig humid (warme Sommer)	$P_{smin} = P_{wmin}; T_{max} < +22^{\circ}\text{C}; \text{mindestens } 4 T_{mon} \geq +10^{\circ}\text{C}$	9	1
Dwa	Schneeklima, trockene Winter (Monsoon-beeinflusste heiße Sommer)	$P_{wmin} < P_{smin}; P_{smax} > 10 P_{wmin}$	2	2

3.2 Klimafolgenanpassungsleistungen Dachbegrünung

In den folgenden Kapiteln werden die im Rahmen des systematischen Reviewverfahrens gewonnen Erkenntnisse bezüglich der unterschiedlichen Anpassungsleistungen von Dachbegrünungen dargestellt. Die Effekte bzw. Leistungen unterteilen sich in die Kategorien hydrologische Effekte und stadtklimatische Effekte. Die Ausprägung bzw. Größenordnungen der Auswirkungen und deren beeinflussende Bedingungen (Substratstärke, Vorfeuchte, Regenmenge und -intensität, Dachalter, Gefälle, Substratzusammensetzung, Pflanzenarten) werden im Rahmen der Meta-Analyse quantitativ bewertet. Die Erkenntnisse zu stadtklimatischen Effekten basieren hauptsächlich auf Modellberechnungen, dementsprechend wird in den dargestellten Ergebnissen darauf spezieller eingegangen.

3.2.1 Hydrologische Effekte Dachbegrünung und beeinflussende Faktoren

Die für die urbane Klimafolgenanpassung entscheidenden Effekte von Gründächern sind Regenwasserrückhalt und -verzögerung und die Erhöhung der Verdunstungsleistung von Dachflächen. Maximale Abflüsse infolge von (Stark-)Regenfällen werden reduziert und zeitlich verzögert, wodurch das Risiko innerstädtischer Überflutungen vermindert und der urbane Wasserkreislauf an den eines natürlichen Einzugsgebietes angenähert werden kann (Richter und Dickhaut 2019). Grundsätzlich wird zwischen langfristigen Effekten (z.B. jährlichem Wasserrückhalt) und kurzfristigen Effekten wie z.B. dem Rückhalt von einzelnen Regenereignissen und der Verzögerungswirkung von Abflüssen unterschieden.

Alle untersuchten Studien zeigten eine Reduktion und Verzögerung des Regenwasserabflusses von Dachbegrünungen im Vergleich zu nicht begrüntem Dächern. Dieses Verhalten ist vor allem auf die temporäre Speicherung und Benetzung des Regenwassers im Substrat und auf den Pflanzenoberflächen zurückzuführen. Als vorgezogene zusammenfassende Aussage bezüglich des Regenwasserrückhalts lassen sich aus der Meta-Analyse folgende Erkenntnisse ableiten:

Die Werte für den langzeitlichen bzw. jährlichen Regenwasserrückhalt bzw. den Anteil des auf ein Dach gefallenen Regenwassers, welcher nicht vom Gründach abfließt, wird bspw. von Mentens et al. (2006) mit 65-85 % für intensive und 27-85 % für extensive Gründächer beziffert. Dieses breite Spektrum gibt in etwa die Varianz anderer Studien wieder. In den in dieser Arbeit untersuchten Ergebnissen verschiedener Artikel reicht die Spanne von 12 % (Spolek 2008) bis 88 % (Hathaway et al. 2008) jährlichem Regenwasserrückhalt bei Extensivdächern und 50 % (Morgan et al. 2013) bis 90 % (Nardini et al. 2012) bei Intensivdächern.

Für einzeln gemessene und analysierte Regenereignisse nehmen die Werte des volumetrischen Regenwasserrückhalts von unterschiedlichen Typen von Dachbegrünungen Werte von 0 % (Fioretti et al. 2010; Hu et al. 2019; Palla et al. 2011; Sherrard, Jr., James A. und Jacobs 2012; Skala et al. 2019; Stovin et al. 2012) bis 100 % an (Andres-Domenech et al. 2018; Fang 2010; Herrera et al. 2018; Lee et al. 2013; Soulis et al. 2017), sowohl bei Extensiv- als auch Intensivgründächern.

Verzögerungen des Abflusses gegenüber dem Regen wurden generell berichtet, die Zeitspannen unterscheiden sich jedoch erheblich. Die Spanne reicht bei den ausgewerteten Studien von nur sehr geringen Verzögerungen des Abflussbeginns von ≤ 1 Min. (Fioretti et al. 2010; Kasmin und Musa 2012; Palermo et al. 2019; Yang et al. 2015) und der Abflussspitzen (gegenüber den maximalen Regenintensitäten) von 1 Min. (Palermo et al. 2019) bis zum Einsetzen des ersten Abflusses (wenn überhaupt Abfluss einsetzt) und der Verzögerung der Abflussspitzen mit mehr als 30 Stunden Verzögerung (Razzaghamanesh und Beecham 2014).

Spezielle Retentionsdächer, die mit einer ausgeprägten Drainageschicht und Abflussdrosseln ausgestattet sind, wurden im Rahmen der Meta-Analyse nicht betrachtet, da keine entsprechenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen vorlagen.

Die Größenordnung der Effekte des Regenwasserrückhalts hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, deren Einfluss in den folgenden Kapiteln beschrieben wird. Die Faktoren, die einen durch wissenschaftliche Untersuchungen nachgewiesenen Effekt auf die Rückhalte-Wirkung von Dachbegrünungen haben, sind Folgende:

- Substratstärke,
- Vorfeuchte,
- Alter,
- Gefälle,
- Regenmenge und -intensität
- Jahreszeit,
- Pflanzenarten sowie
- Substrattyp/-zusammensetzung.

Substratstärke

Die Erhöhung der Substratauflage von Dachbegrünungen scheint die wohl sicherste und in der Wissenschaft auch am meisten nachgewiesene technische Veränderung zu sein, um das Rückhaltevermögen

von Dächern zu steigern. Je höher die Substratschicht der Dachbegrünung, desto mehr Regenwasser kann im Normalfall auf dem Dach zurückgehalten werden, d.h. intensive Dachbegrünungen weisen dadurch im Regelfall ein höheres Wasserrückhaltepotenzial auf als extensive Dachbegrünungen (Mentens et al. 2006). Dieser Effekt wurde auch in Regelwerke übernommen und gilt als in der Praxis anerkannt (Deutsches Institut für Normung 2016a; FLL 2018). Während eines Regenereignisses nehmen Substrate so viel Wasser auf bis deren Feldkapazität erreicht ist, vorher kommt es meist zu keinem Abfluss (Bengtsson et al. 2005). Die Feldkapazität beschreibt die Menge an Wasser, die ein Boden aufnehmen und gegen die Schwerkraft halten kann (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2005). Sobald dieser Punkt erreicht ist, wird das überschüssige Wasser als Abfluss abgegeben (Carter und Rasmussen 2006). Die Feldkapazität kann auch als Wasserspeicherkapazität des Substrats bezeichnet werden. Auch die Abflussverzögerung wächst mit zunehmenden Substratstärken, wobei soweit bekannt kein linearer Zusammenhang besteht (Yio et al. 2013).

Vorfeuchte

Die sog. Vorfeuchte, also der vor einem Regen herrschende Wassergehalt im Substrat, bestimmt die Menge an Wasser, die noch aufgenommen werden kann, bis die Feldkapazität erreicht ist und überschüssiges Wasser abfließt. In diesem Zusammenhang wird in vielen Studien die ADWP angegeben, also die Länge der Periode ohne Niederschlag vor dem betrachteten Regenereignis. Längere ADWP führen zur stärkeren Austrocknung der Substrate und erhöhen somit das Wasser-Aufnahmepotenzial und führen in der Folge zu einem höheren Wasserrückhalt der Gründächer (Razzaghmanesh und Beecham 2014). Dementsprechend fanden Stovin et al. (2012) einen direkten Zusammenhang zwischen kurzen ADWP und geringem Wasserrückhaltevermögen. Bereits 1987 stellte Kolb fest, dass mit zunehmender Vorsättigung des Substrats die Retention bei begrünten Dächern abnimmt (Kolb 1987). Im Sommer wird das Retentionsvermögen von Dachbegrünungen nach einem Niederschlagsereignis auf Grund erhöhter Evaporation und Transpiration schneller als im Winter wiederhergestellt (Mentens et al. 2006; Poë et al. 2015). Dieser Effekt kann jedoch zum Teil durch die im Sommer oft vorherrschenden höheren Regenintensitäten überlagert werden (Toronto and Region Conservation Authority 2006). Van Seters et al. (2009) bspw. berichten von deutlich verringertem Retentionsvermögen von Dachbegrünungen mit kürzer werdenden Tagen. Während der Regenwasserrückhalt bei sommerlichen Ereignissen noch bei 78-85 % lag waren es in den Wintermonaten 39-64 % (van Seters et al. 2009). Die Reduzierung und Verzögerung der Abflussspitzen (Spitzenabflussbeiwert C_s) werden nach Ergebnissen von Kolb (1987) und Voyde et al. (2010) allerdings nicht durch aufeinanderfolgende Regenereignisse beeinträchtigt. Pattinson (2013) beschreibt einen Hysterese-Effekt bei Dachbegrünungssubstraten,

der den natürlichen Böden ähnelt, wodurch die maximale Wasseraufnahmekapazität des Substrats von der Jahreszeit bzw. Vorfuchte abhängt. Das Wasseraufnahmevermögen variiert demnach mit dem vorangegangenen Wassergehalt und dem Trocknungs- bzw. Befeuchtungszyklus (Pattinson 2013). Das bedeutet, dass angefeuchtete Substrate zunächst mehr Regenwasser aufnehmen können als trockene. Dies ähnelt dem Verhalten natürlicher Böden.

Alter

Mit zunehmendem Alter von Dachbegrünungen können sich Porenvolumen und -größen der Substrate durch die Ansammlung und Setzung organischen Materials verändern (Getter et al. 2007). Es kommt außerdem zum Verlust von Partikeln und gelösten Substanzen durch Auswaschen und der Veränderung der Porosität des Substrats durch z.B. Wurzelentwicklung (Speak et al. 2013a). Getter et al. (2007) stellten bspw. fest, dass sich innerhalb von 5 Jahren sowohl der Gehalt an organischer Substanz als auch das Porenvolumen des Substrats verdoppelten, wodurch sich die Wasserkapazität von 17 auf 67 % erhöhte. Durch diese Eigenschaften kann ein verändertes Abflussverhalten erwartet werden. Die bisherigen Ergebnisse unterschiedlicher Studien zeigen jedoch kein einheitliches Bild. Während Speak et al. (2013a) erhöhte Wasserrückhaltekapazitäten bei einem 43 Jahre alten Gründach feststellten, konnten Mentens et al. (2006) keine Korrelation des Dachalters mit dem Wasserrückhalt nachweisen. Getter et al. (2007) stellen fest, dass es u.U. bei älteren Dachbegrünungen durch die Zersetzung von Wurzeln und Grabungen von Insekten zu Makroporen-Strömung und dadurch schneller zum Abfluss kommen kann.

Gefälle

Verschiedene Studien zum Einfluss der Dachneigung auf das Regenabflussverhalten von Dachbegrünungen kommen zu teilweise gegensätzlichen Ergebnissen. Mentens et al. (2006) und Bengtsson (2005) konnten keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Dachneigung und dem jährlichen Abfluss feststellen. Für einzelne Regenereignisse konnten jedoch u.a. Villarreal und Bengtsson (2005), van Woert et al. (2005) und Getter et al. (2007) sinkenden Regenrückhalt mit steigendem Gefälle nachweisen. Nach Villarreal und Bengtsson (2005) hat die Dachneigung keinen Einfluss auf die Form der Abflusskurve im Sinne der Änderung des Abflussvolumens und der Abflussmaxima. Die Konzentrationszeit bzw. die Zeit, die das Regenwasser benötigt, um durch das Substrat zu sickern, sei hauptsächlich von der vertikalen Bewegung und Speicherung im Substrat abhängig (Bengtsson 2005). Das würde bedeuten, dass ein Einfluss der Drainageschicht bei höheren Neigungswerten zustande kommt.

Regenmenge und -intensität

Die Forschung zur Anhängigkeit des Regenrückhaltevermögens von der Regemenge und -intensität sind recht eindeutig in dem Sinne, dass die prozentuale Regenrückhaltung mit zunehmender Menge und -intensität abnimmt (Carson et al. 2013; Carter und Rasmussen 2006; Razzaghmanesh und Beecham 2014; Simmons et al. 2008; Stovin et al. 2015; van Woert et al. 2005; Villarreal und Bengtsson 2005). Der Grund für dieses Verhalten könnte die bei höheren Regenmengen und -intensitäten schnellere Sättigung des Substrats sein, wobei andere Faktoren wie z.B. die Vorfeuchte auch eine Rolle spielen (Razzaghmanesh und Beecham 2014). Messungen in unterschiedlichen Jahreszeiten zeigten bspw., dass die negative Korrelation zwischen Regenmenge und Rückhalt im Frühling und Sommer weniger stark ausfällt (Toronto and Region Conservation Authority 2006). Das wäre auf die lang anhaltenden Regenfälle mit niedrigen Intensitäten im Herbst zurückzuführen, die die Feuchte des Substrats hochhalten und dadurch die Rückhaltekapazität für einzelne Regenereignisse geringhalten (Toronto and Region Conservation Authority 2006). Besonders in der kalten Jahreszeit kann es zu höheren Abflüssen kommen deren Summe größer als die zugeordnete Regensumme ist (Knoll 2000). Das geschieht durch den unmittelbar vor dem eigentlichen Abfluss des Regens einsetzenden Abfluss von Wasser, das im Dachaufbau gespeichert war oder es führt zur Überlagerung von langgestreckten Abflussganglinien zweier Regenereignisse (Knoll 2000).

Jahreszeit

Höhere Temperaturen führen zu höheren Evapotranspirationsleistungen. Dies führt zur schnelleren Regeneration der Wasserrückhaltekapazität von Gründächern und somit zu geringeren Abflüssen von folgenden Regenereignissen (Mentens et al. 2006; Villarreal und Bengtsson 2005). Zu beachten ist jedoch, dass die maximale Wasserkapazität bei feuchten Verhältnissen etwas größer zu sein scheint als bei trockenen Verhältnissen. Dies ist durch Befeuchtungs- und Trocknungszyklen (Hysterese) bedingt (Pattinson 2013). Dieser Effekt wurde teilweise durch Speak et al. (2013a) bestätigt. Letztlich, auch bedingt durch sich überlagernde Effekte, weisen verschiedene Studien einen Trend in Richtung höherer Wasserrückhalte in den Sommermonaten nach (Mentens et al. 2006).

Pflanzenarten

Auch die Vegetationsstruktur und Artenzusammensetzung beeinflusst den Regenwasserrückhalt von Dachbegrünungen. Je höher die Blattfläche bzw. der Blattflächenindex (leaf area index LAI) von Pflanzen, desto höher ist ihr Interzeptionsvermögen (temporäre Wasserspeicherung an Blattoberflächen).

Außerdem vergrößert ein ausgedehnteres Wurzelsystem das Wasserrückhaltevermögen und die Abflussverzögerung aufgrund einer erhöhten, über die Wurzeln aufgenommene Wassermenge (Nagase und Dunnett 2012). Dementsprechend beurteilten Dunnett et al.(2008a) und Nagase und Dunnett (2012) die Eignung zur Erhöhung der Rückhaltekapazität von Gräsern am höchsten, gefolgt von krautigen Arten und Sedum-Arten. Sie konnten einen signifikanten Unterschied im Abflussvolumen von unterschiedlich bewachsenen Dächern nachweisen. Demnach empfehlen sie im Falle der Zielsetzung einer möglichst hohen Wasserrückhaltung auf Gründächern, möglichst hoch gewachsene Gräser und Stauden mit großen Stamm- und Wurzelbiomassen zu verwenden (Nagase und Dunnett 2012). Zu ähnlichen Ergebnissen kamen Mickovski et al. (2013), die deutlich geringere Oberflächenabflüsse in Laborversuchen mit langblättrigen Gräsern im Vergleich zu kurzblättrigen Gräsern und Sedum-Arten bei unterschiedlichen Regendauern beobachteten. Arten mit höheren Evaporationsleistungen führen zu schnellerer Abtrocknung des Substrats und somit einer schnelleren Regeneration des Wasseraufnahmevermögens (Maclvor and Lundholm 2011). Ouldboukhite et al. (2012) zeichneten bspw. um 60 % höhere tägliche Evapotranspirationsraten für Gräser (2,34 mm) als für Sedum (1,42 mm) auf Dachbegrünungen auf. Das heißt aber auch, dass gleichzeitig die Tendenz zu schnellerer Austrocknung besteht. Unter Bedingungen, die nur das Überleben stresstoleranter Arten wie Sedum zulassen, würden verschiedene Sedum-Arten trotzdem effektiver im Regenwasserrückhalt sein als vertrocknende Gräser (Nagase and Dunnett 2012). Ein weiterer Aspekt, den Maclvor und Lundholm (2011) berichten ist, dass Gräser mit sehr dichten, faserigen Wurzeln die Substratporosität und dementsprechend das Wasserrückhaltevolumen herabsetzen können. Aufgrund der jahreszeitlichen Entwicklung der Vegetation sind die hydrologischen Effekte der Vegetation vor allem bedeutend in wärmeren Monaten bzw. während der Vegetationsperioden und nahezu vernachlässigbar im Winter (Dunnett et al. 2008a; Steusloff 1998).

Substrattyp/-zusammensetzung

Substrate, die teilweise feinere Korngrößen wie sandigen Lehm enthalten, können nach Kurtz (2008) höhere Retentionskapazitäten haben. Gleiches gilt für den Gehalt an organischer Substanz im Substrat. Mit höherem Gehalt an Organik kann die Retentionsleistung erhöht werden (Speak et al. 2013a; Yio et al. 2013). Trotz dieses Sachverhalts wird in Regelwerken wie den FLL-Dachbegrünungsrichtlinien (FLL 2018) ein Gehalt an organischer Substanz in Substraten von < 6,5 % empfohlen. Diese Empfehlung kommt zustande, da angenommen wird, dass ein höherer Anteil an Organik zur Auswaschung von Nährstoffen führen könnte (Gregoire und Clausen 2011; Harper et al. 2015) und somit auch die Porosität der Substrate verändert würde. Außerdem hätten die Substrate geringere Drainagefähigkeiten und es würde die Gefahr der Vernässung bestehen (Fassman und Simcock 2012; Rowe et al. 2006).

Gleichzeitig gibt es in der Wissenschaft noch Zweifel an dieser Theorie (Hill et al. 2017). Wasserspeichernde Zusatzstoffe können die Pflanzenauswahl über trockenheitstolerante Arten hinaus erhöhen und die Regenrückhalte-Wirkung verbessern (Farrell et al. 2013; Mentens et al. 2006; Villarreal und Bengtsson 2005).

Drainage

Das Vorhandensein und der Typ einer Drainageschicht kann Einfluss auf den Wasserrückhalt und das Abflussverhalten haben. Mit einer (klassischen) Drainageschicht ist der Abfluss schneller und der Abflusspeak höher als ohne (Bengtsson 2005).

3.2.2 Stadtklimatische Effekte Dachbegrünung und beeinflussende Parameter

Dachbegrünungen beeinflussen wie auch andere grüne Infrastrukturen das Stadtklima. Bei begrünten Dächern tritt ein höherer latenter und ein verringerter sensibler Wärmestrom auf (Kolokotsa et al. 2013). Das ist vor allem auf die Verdunstungsleistung der Vegetation zurückzuführen, wodurch etwa bei extensiv begrünten Dächern nur 42 % der eintreffenden Strahlung in Wärme umgewandelt wird (95 % bei konventionellen Dächern), der Rest wird in Verdunstungskälte umgesetzt (Pfoser et al. 2014). Das Potenzial zur Abkühlung nahe dem Erdboden bzw. in 1-2 m Höhe reicht je nach Studiendesign nach einem Review von Francis und Jensen (2017) von 0,03 °C bis 3 °C, ähnliche Werte (0,3 - 3 °C) wurden in einem Review von Santamouris (2014) beschrieben. Die tatsächliche Wirkung hängt jedoch eng mit der Wasserversorgung der Vegetation zusammen, d.h. ein stetiges Wasserdargebot durch Regenwasserspeicherung oder Bewässerung führt zu einer Erhöhung der Werte (Santamouris 2014). Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl an Faktoren von der die Kühlwirkung auf die Umgebung abhängt, wodurch eine allgemeine Aussage zum Umfang der zu erwartenden Wirkung erschwert wird (Brune et al. 2017). Grundsätzlich zeigen die Studien, dass die kühlende Wirkung auf die Lufttemperatur mit zunehmendem Abstand zur Dachbegrünung abnimmt. Damit hängt auch der Effekt zusammen, dass mit Zunahme der Gebäudehöhe die Kühlwirkung im Straßenraum abnimmt. Erhöhte Kühlwirkung kann nach Francis und Jensen (2017) mit abnehmender Bebauungsdichte, zunehmender Vegetationsdichte (LAI), zunehmender Vegetationsbedeckung der Dachbegrünungen und besserer Wasserversorgung der Pflanzen erlangt werden. Wie diese Effekte auf die Kühlwirkung Einfluss nehmen, wird im Folgenden erläutert.

Gebäudehöhe

Peng und Jim (2013) erklären einen negativ gerichteten Zusammenhang von Gebäudehöhe und maximaler Kühlwirkung im Straßenraum mit der möglichen Abschwächung bzw. Zerstreung der vertikalen Luftbewegung bei zu großen Höhenunterschieden. Die Gebäudehöhe bis zu der eine auf dem Dach befindliche Begrünung effektiv zur Kühlung im Straßenraum beitragen kann, wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich angegeben. Müller et al. (2014), Ng et al. (2012) und Wong et al. (2003) berichteten bspw. kaum Kühleffekte, wenn die Gebäude höher als 10 m sind. Ein Effekt, der zusätzlichen Einfluss nehmen könnte ist die Weite der Straßenschluchten. So berichten etwa Ahiablame et al. (2012) und Ng et al. (2012), dass der Kühleffekt von Dachbegrünungen nur gering sei, wenn das Verhältnis von Gebäudehöhe zu Straßenbreite größer als 1 ist. Das würde bedeuten, dass wenn die Breite der Straßenräume größer als die Höhe der Gebäude ist, würde der Kühleffekt signifikanter ausfallen.

Bebauungsdichte/-typen

Die Dichte der Bebauung scheint auch einen Einfluss auf die Kühlleistung von Dachbegrünungen zu haben. Peng und Jim (2013) konnten mögliche Einflüsse von Stadtgestaltungsparametern auf die Kühlung nachweisen. Unter diesen Effekten waren neben der Gebäudehöhe auch der Anteil an bebauten Flächen, die Bebauungsdichte und die Orientierung von Straßen. Als Grund dafür geben sie an, dass mit geringerer Bebauungsdichte der vertikale und laterale Luftaustausch gefördert würde und somit die Kühlwirkung der Dachbegrünungen effektiver in die unteren Luftschichten transportiert werden können. Als günstigste Kombination bezüglich der Kühlwirkung nennen sie flache Gebäude, eine geringe Bebauungsdichte und in der Hauptwindrichtung angeordnete Straßenräume (Peng und Jim 2013).

Tag/Nacht

Mit unterschiedlichen Strahlungseinflüssen und der Aktivität der Vegetation (Verdunstung) ändern sich auch die Effekte, die zur Kühlung durch Dachbegrünungen im Tagesgang beitragen. Bepflanzte Dächer weisen höhere Tagesminimum- und geringere Tagesmaximaltemperaturen (Jim 2012) und somit eine geringere Amplitude im Tagesverlauf auf (Heusinger und Weber 2015; Hoelscher et al. 2016). Unterschiede der Intensitäten der Kühlwirkungen werden zwischen Tag und Nacht berichtet. Während Jim (2012) und Müller et al. (2014) keine nächtliche Kühlwirkung nachwiesen, konnten Berardi (2016) nachts höhere Kühlleistungen als am Tag messen. Müller et al. (2014) hingegen konnten deutliche positive Effekte auf den thermischen Komfort am Tag bei großflächiger Umsetzung von Gründächern berechnen.

Vegetationstypen

Aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften verwendeter Pflanzenarten und deren Vegetationsstruktur wie Bedeckungsgrad, Blattoberflächen (LAI), Dicke der Vegetationsschicht, Stomata Widerstand, solare Reflexion und Absorption, Wärmeleitfähigkeit, Morphologie und Transpirationsrate haben diese auch einen Einfluss auf die Kühlleistung von Dachbegrünungen (Brune et al. 2017; Cascone et al. 2019; Fang 2008; Zhang et al. 2019). Der Bedeckungsgrad beeinflusst die Oberflächentemperatur und die Austrocknung des Substrats. Im Fall der Austrocknung kann es zu erhöhten Umgebungstemperaturen kommen (Speak et al. 2013b). Unterschiedliche Pflanzenarten können die Kühlung z.B. durch deren Verdunstungsleistung und Albedo beeinflussen (Cameron et al. 2014; Kolokotsa et al. 2013; Peng und Jim 2013). Wichtig ist jedoch zu beachten, dass Pflanzen mit hohen Verdunstungsleistungen meist auch anfälliger gegenüber Trockenheit sind und somit z.B. Sedum-Arten länger unter trockenen Bedingungen auf Dächern überleben als bspw. Gräser oder krautige Arten (Cook-Patton und Bauerle 2012; Dunnett et al. 2008a). So können beispielsweise viele Sedum-Arten länger als Gräser oder krautige Pflanzen unter den harschen Bedingungen, die auf Dächern herrschen, überleben (Cook-Patton und Bauerle 2012; Nagase und Dunnett 2012). Diverse Mischungen unterschiedlicher Pflanzenarten und -typen scheinen diesbezüglich am effektivsten (Cook-Patton und Bauerle 2012).

Flächengrößen

Die Größe begrünter Dächer bzw. der Flächenanteil an einem bestimmten Stadtraum scheint ein kritischer Parameter zur Beeinflussung der Umgebungstemperaturen zu sein. Alle Studien, die Flächengrößen oder begrünte Dach-Flächenanteile von Stadträumen betrachten, kommen zu dem Schluss, dass, je größer die Flächen bzw. je höher der Anteil begrünter Flächen ist, desto größer der Kühleffekt. Li et al. (2014) konnten bspw. einen linearen Zusammenhang zwischen der Gründachbedeckung der Region Baltimore-Washington und der maximalen UHI-Intensität in 2 m Höhe modellieren (siehe Abbildung 26). Mackey et al. (2012) und Sun et al. (2016) fanden ebenfalls lineare Beziehungen zwischen Abkühlungsraten und den Anteilen bepflanzter Dachflächen. Diese Beziehung sei bisher noch nicht gut untersucht, wäre wohl aber ein gutes Vorhersagemodell für die Beurteilung der Effektivität von Dachbegrünungen (Suter et al. 2017). Signifikante Änderungen der Umgebungstemperaturen werden allerdings auf einen größeren Stadtraum bezogen erst ab sehr hohen Flächenanteilen berichtet. Sahnoune und Benhassine (2017) bspw. nennen ein Minimum von 50 % aller Dachflächen. Ein möglicher Nachteil einer großflächigen Umsetzung von Dachbegrünungen könnte eine Verringerung der oberflächennahen Windgeschwindigkeiten und damit eine Verringerung des Luftaustausches und daraus folgende Luftqualitätsprobleme sein (Susca 2019).

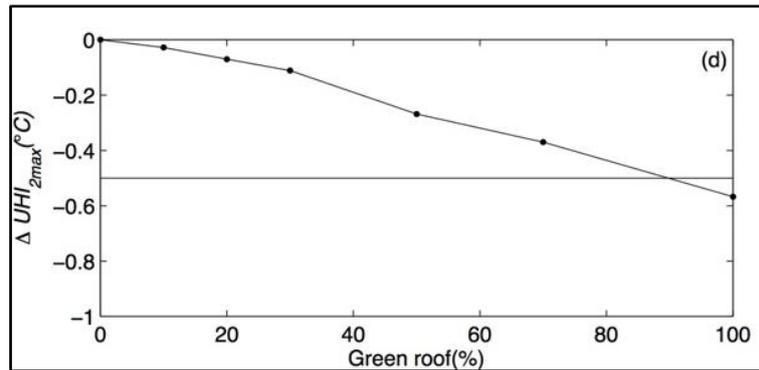


Abbildung 26: Linearer Zusammenhang zwischen Anteil der begrünten Dachflächen und dem maximalen Hitzeinseleffekt in 2 m Höhe in der Region Baltimore-Washington (Li et al. 2014).

Wasserversorgung

Kühlung durch Evapotranspiration kann bei ausreichender Wasserversorgung der Pflanzen einen signifikanten Beitrag zur Kühlung von Städten leisten (Susca 2019; Suter et al. 2017). In Trockenzeiten reduziert sich die Kühlwirkung jedoch, da die Pflanzen ihre Transpiration einstellen und Substrate meist schnell austrocknen und dadurch keine Evaporation mehr beitragen (Jim 2015). Durch Bewässerung oder Verbesserung der Wasserverfügbarkeit durch Niederschläge erhöht sich die Kühlwirkung (Brune et al. 2017; Köhler et al. 2003; Kolokotsa et al. 2013). Durch dichte Pflanzenbedeckung auf Dachbegrünungen kann die Austrocknung von Substraten hinausgezögert und der Verdunstungseffekt länger aufrechterhalten werden (Jim 2015). Der Effekt der Wasserverfügbarkeit kann, wie bspw. Bass, Krayenhoff und Martilli (2002) anhand von Modellierungen für Toronto zeigten, in einer zusätzlichen Abkühlung der Umgebungstemperaturen um mehrere Grad Celsius (1-2 °C) resultieren.

Breitengrad/Klimazone

Generell zeigen die Untersuchungen, dass der Kühlungseffekt für die Umgebung mit dem (geografischen) Ort der Dachbegrünung variiert. Klimatische Bedingungen wie Temperaturen, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeiten, solare Einstrahlung und die Abfolge und Dauer von Trocken- und Feuchteperioden beeinflussen die Kühlleistung von Dachbegrünungen (Brune et al. 2017; Susca 2019). Von diesen Faktoren hängen u.a. die Evapotranspirationsleistung, aber auch die Tendenz zur Austrocknung ab. Es scheint in den untersuchten Studien eine klare Tendenz bezüglich einer stärkeren potenziellen Kühlleistung von Dachbegrünungen mit zunehmend trockeneren und wärmeren Klimaten zu geben (Alexandri und Jones 2008; Berardi et al. 2014; Kolokotsa et al. 2013). Katsoulas et al. (2017) stellen fest, dass je mehr solare Einstrahlung ein Dach bekommt, desto größer ist der Kühleffekt, wenn es mit Pflanzen bedeckt ist. Das wird hauptsächlich auf die erhöhte Evapotranspirationsleistung bei warmen und sonnigen Bedingungen zurückgeführt (Peng und Jim 2015). Auch innerhalb der Jahreszeiten zeigt

sich dieser Effekt an ein und demselben Ort. Während sonnigem Wetter tendieren Dachbegrünungen dazu, einen signifikanteren Kühleffekt zu entwickeln als während Bewölkung (Peng und Jim 2015).

3.2.3 Auswertung Meta-Analyse

Wie bereits in Abbildung 19 dargestellt wurde die Meta-Analyse mit Daten aus insgesamt 82 Studien zur Regenwasserbewirtschaftung und 41 Studien zur Beeinflussung der UHI mit Dachbegrünungen durchgeführt. Da die meisten dieser Studien Ergebnisse aus mehreren einzelnen gemessenen oder modellierten Hitze- oder Regenereignissen, langfristigen saisonalen Untersuchungen und teilweise auch von mehreren Gründächern darstellten, war die Anzahl der Datenpunkte N , mit denen die statistischen Analysen durchgeführt werden teilweise deutlich größer. Die maximale Anzahl der Datenpunkte war bedingt durch die Anzahl der Studien am größten beim Themenkomplex Regenwasserbewirtschaftung mit Dachbegrünungen ($N_{\max} = 1197$). Zum Thema UHI-Reduzierung mittels Dachbegrünung war $N_{\max} = 169$. Da nicht alle Datenpunkte auch alle Parameter abbildeten, wurden die meisten statistischen Untersuchungen mit weniger als dieser Anzahl durchgeführt. In den meisten Fällen wurde die Anzahl der untersuchten Datenpunkte bzw. Fälle (N) bei den folgenden Auswertungen angegeben. Um die Unterscheidung zwischen Anzahl der Studien, Anzahl der Dächer und Anzahl der Datenpunkte zu veranschaulichen wird auf Tabelle 7 verwiesen. Bei diesem Auszug der Datenbank handelt es sich um Daten aus einer Studie (Sobczyk und Mrowiec 2016), also ist die Anzahl der Studien = 1. Es handelt sich um zwei unterschiedliche Dächer, da die Substrattiefe und die Drainage unterschiedlich sind, also Anzahl der Dächer = 2. Und letztendlich ist die Anzahl Datenpunkte = 4, da beide Dächer bzw. Dachtypen jeweils mit zwei unterschiedlichen Regenereignissen beregnet wurden. Die vollständigen Analyse-Datenbanken sind im digitalen Tabellenanhang einzusehen.

Tabelle 7: Auszug aus der Datenbank zur Meta-Analyse (Datenauszug aus Sobczyk und Mrowiec (2016)). Die Daten zur Studie sind nicht vollständig dargestellt.

Authors	Year	Location	Experimental set-up	Size [m ²]	substrate depth [mm]	drainage	Precipitation [mm]
Sobczyk, M.; Mrowiec, M.	2016	Warsaw	test plot	1,4	80	absorbent protective mat SSM	7,1
Sobczyk, M.; Mrowiec, M.	2016	Warsaw	test plot	1,4	80	absorbent protective mat SSM	11,4
Sobczyk, M.; Mrowiec, M.	2016	Warsaw	test plot	1,4	60	Bauder DSE 40	7,1
Sobczyk, M.; Mrowiec, M.	2016	Warsaw	test plot	1,4	60	Bauder DSE 40	11,4

3.2.4 Hydrologische Effekte Dachbegrünung und beeinflussende Faktoren

Auf die grundsätzlich möglichen hydrologischen Effekte von Dachbegrünungen und deren beeinflussende Faktoren wurde bereits in Kapitel 3.2.1, mit entsprechenden physikalisch-ökologischen Ursachen der Einflussfaktoren, eingegangen. Die Auswertungen der Meta-Analyse zu den hydrologischen Effekten von Dachbegrünungen dienen der quantitativen Abschätzung möglicher Potenziale und der Verifizierung der in den einzelnen Studien untersuchten Effekte. Die Analyse bezüglich der hydrologischen Effekte kann in 3 Teile unterteilt werden. Zuerst werden die unterschiedlichen Untersuchungsdesigns dargestellt, bevor der langfristige Regenwasserrückhalt und darauffolgend der kurzfristige Regenwasserrückhalt von Einzelereignissen auf Dachbegrünungen statistisch untersucht wurde.

3.2.4.1 Untersuchungsdesign der Studien zur Regenwasserbewirtschaftung mit Dachbegrünungen

Methodische Unterschiede zwischen den einzelnen Studien werden hier dem eigentlichen Ergebnis der Meta-Analyse vorangestellt, um deren Aussagen besser einordnen zu können. Die Unterschiede beziehen sich vor allem auf die Eigenschaften, die das hydrologische Verhalten der Dachbegrünungen beeinflussen können. Insgesamt wurden in den Studien zur Regenwasserbewirtschaftung 199 unterschiedliche Dächer (oder unterschiedliche technische Dachaufbauten an denselben Dächern) ausgewertet. Grundsätzlich bestehen Unterschiede im Versuchsdesign zwischen „Labor“- und realen „Freilandbedingungen“ durch die Ausgestaltung der untersuchten Dachbegrünungen als relativ kleine, nur wenige m² große test-plots (Minimum: 0,1 m²) oder großskaligen Dächern mit mehreren 100 m² oder >1000 m² (Maximum: 6968 m²). Die Anzahl der unterschiedlichen Flächengrößen-Klassen ist in Abbildung 27 dargestellt. Deutlich wird hier, dass die häufigsten Studien an Dächern mit sehr kleinen Flächengrößen durchgeführt wurden, sog. test-plots oder test-beds mit weniger als 5 m² Größe, wie beispielhaft in Abbildung 28 dargestellt. Diese sind meist mit einem Gründachaufbau versehene Messtische, die entweder im Freiland oder in Laboren aufgestellt werden. Durch die relativ einfache Handhabung und Reproduzierbarkeit ist diese Art der Untersuchung wohl am häufigsten von der reinen Anzahl der unterschiedlichen Dachtypen (N=113) und daraus resultierend auch in den Datenpunkten, die in die statistische Analyse eingehen (N=822). Weitere häufige Größenkategorien sind 5-10 m², 10-50 m² und 200-500 m².

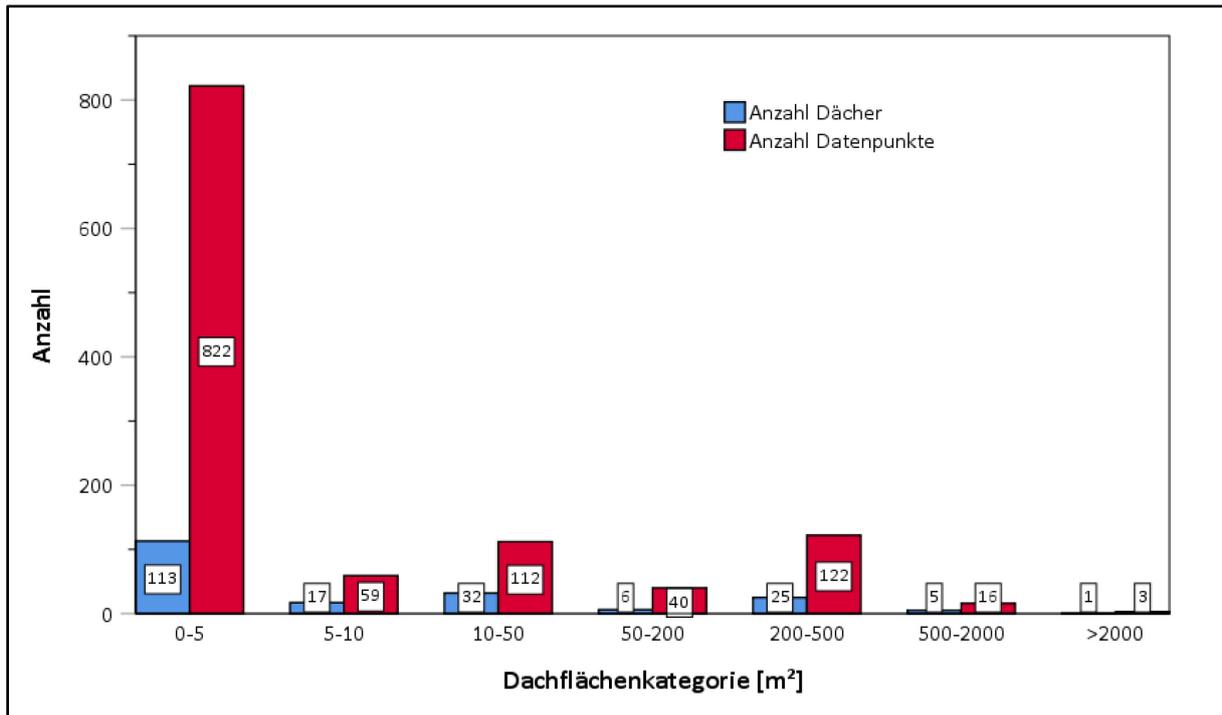


Abbildung 27: Anzahl der in den Studien untersuchten Gründach-Flächengrößen. Die Größen-Klassen haben aufgrund der besseren Darstellbarkeit unterschiedliche Bereiche bzw. Breiten. Es wird unterschieden zwischen der Anzahl untersuchter unterschiedlicher einzelnen Dächer bzw. deren Bautypen (blau) und den Datenpunkten, die mithilfe dieser Dächer erhoben wurden und in die Auswertung einfließen (rot). Zur besseren Übersicht ist die jeweilige Anzahl ist an den Balken vermerkt.



Abbildung 28: Beispielhafte Abbildung eines Gründach-test-plots in Adelaide, Australien (aus (Razzaghmanesh und Beecham 2014).

Als bedeutender Faktor für die Regenwasserbewirtschaftung wird die Stärke der Substratauflage betrachtet. Anhand der in den Studien genutzten Dächern, die in die statistischen Analysen eingegangen sind, sind in Abbildung 29 die Häufigkeit der unterschiedlichen Substratdicken und die Unterscheidung zwischen extensiv und einfach-intensiv bzw. intensiv (> 150 mm) aufgetragen. Es wird ein deutliches Übergewicht an extensiv begrüntem Dächern sichtbar. Der Anteil ist hier mit 77% Extensivgründächern größer als bei der Betrachtung der einzelnen zur statistischen Analyse genutzten Datenpunkte. Dabei

waren 73% Extensivdächern zuzuordnen und 27% Intensiv- oder Einfachintensivdächern, was darauf hindeutet, dass bei den einzelnen Intensivdächern vergleichsweise mehrere Daten in den Studien erhoben wurden. Deutliche Maxima in der Anzahl der Dächer sind bei den Substratstärken 60-70, 80-90, 100-110 und 150-160 mm erkennbar, was wohl auf typische Bauweisen in unterschiedlichen Regionen hindeutet.

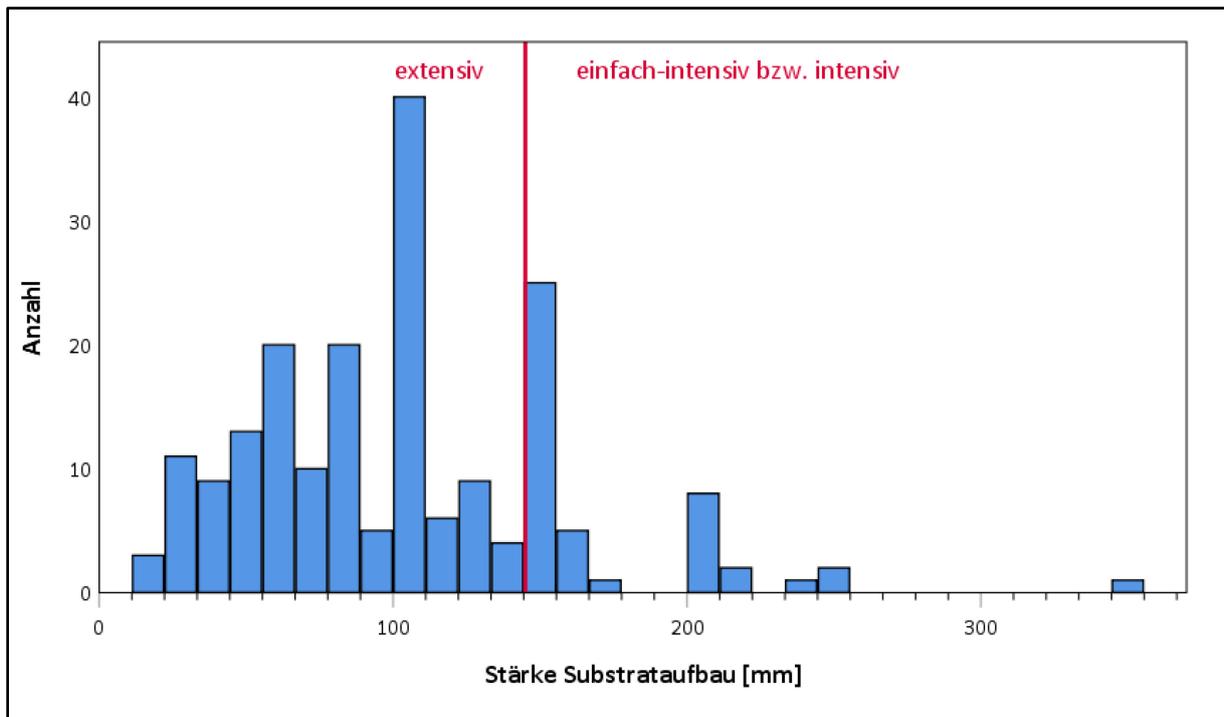


Abbildung 29: Histogramm mit Häufigkeiten der Substratstärken, bezogen auf die einzelnen Dachbegrünungen in den Studien. Dachbegrünungen mit Substratstärken <150 mm werden als extensiv kategorisiert, mit Substratstärken ab 150 mm als einfach-intensiv bzw. intensiv.

Von den in die Datenbank aufgenommenen Dachbegrünungen waren 22 % reale Dächer und 78 % test-plots. Der Großteil der untersuchten Dachbegrünungen waren mit Drainageschicht ausgestattet (63 %, keine Angabe bei 18 Dächern) und in den meisten Fällen wurden Untersuchungen mit bepflanzten Dächern durchgeführt (73 %). Außerdem wurden 23 % künstlich beregnet und 77 % der Studien nutzen natürlichen Regen (keine Angaben bei 31 Dächern). Der Anteil der organischen Substanz im Substrat unterschied sich ebenfalls erheblich in den unterschiedlichen Untersuchungen. Bei den Dächern in denen dieser Wert angegeben wurde (n = 52), enthielten die Substrate von 2 – 40 % organischer Substanz, die meist aus kompostierten Pflanzenteilen bestand. Bei den in den Studien angegebenen Gefällewerten war die Mehrheit im Bereich von 0–10 % verortet (Abbildung 30), das maximale Gefälle in einer Studie lag bei 84 % (Murphy et al. 2018). Sowohl die Substratstärken als auch die Gefälle wurden hinsichtlich ihrer eventuellen Unterschiede in klimatischen Regionen untersucht. Das sollte Hinweise da-

rauf liefern ob in den Klimazonen aufgrund unterschiedlicher technischer Bauweisen veränderte hydrologische Eigenschaften zu erwarten wären. Sowohl die Kruskal-Wallis-Tests als auch die einfaktorielles ANOVA zum Vergleich der Mediane bzw. Mittelwerte der Substratstärken und Gefälle in den verschiedenen Köppen-Geiger-Klimahauptgruppen (A, B, C, D) zeigten keine signifikanten Unterschiede.

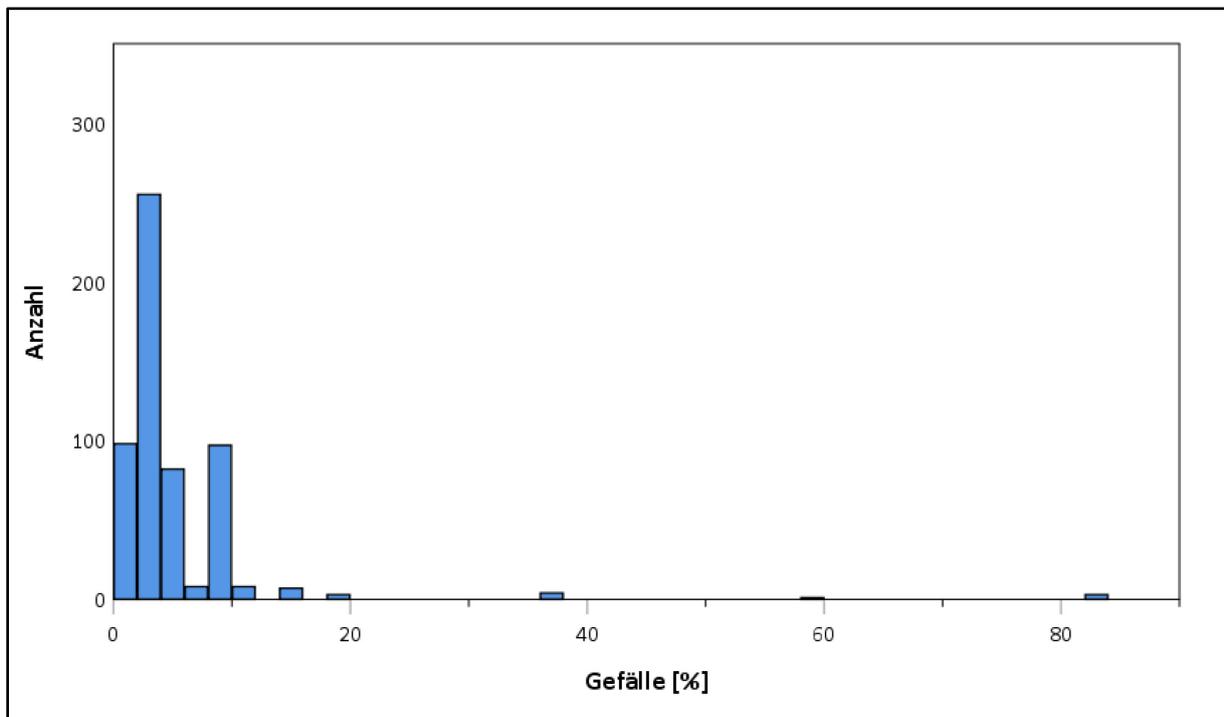


Abbildung 30: Histogramm der Häufigkeit der Dachgefälle an untersuchten Dächern (Intervallbreite: 2 %).

Auch die Vegetation auf Dachbegrünungen hat einen Einfluss auf das Regenwasserabflussverhalten, u.a. durch ihr Interzeptionsverhalten und verschiedene Verdunstungsraten. Die Häufigkeit der unterschiedlichen in den Studien verwendeten Vegetationstypen (wenn angegeben) ist in den folgenden Abbildungen (Abbildung 31 und Abbildung 32) gegenübergestellt. Hier wird unterschieden zwischen den Haupttypen. Das heißt, dass bei Pflanzenmischungen nur die häufigste Art als Vegetationstyp zur Auswertung übernommen wurde. Die Haupt-Vegetationstypen sind Sedum- oder Sukkulentearten, Gräser, krautige Pflanzen (einjährige), Stauden (mehrjährige) und Sträucher bzw. Gehölze (verholzte Pflanzenarten). Auf 56 % der untersuchten Dächer sind Sedum-Arten vorherrschend, weitere Vegetationstypen wurden deutlich weniger häufig verwendet (<10 %). Da bei der Analyse der Substratstärken ein Übergewicht an geringen Dicken bis 150 mm (extensiv begrünte Dächer) festgestellt wurde scheint die häufige Verwendung von Sedum-Arten folgerichtig. Auch in den unterschiedlichen klimatischen Regionen entsprechend der Klimahauptgruppen nach Köppen-Geiger spiegelt sich die Häufigkeit der Sedum-Arten meist wieder (Abbildung 32). Allein in der Klima-Hauptgruppe A (tropisches Regenklima) wurde mit 100 % Gräsern begrünt, was bezüglich der Wasserverfügbarkeit durchaus Sinn macht. Da

hier aber nur insgesamt 2 Dächer in die Analyse eingegangen sind ist diese Aussage nur wenig belastbar.

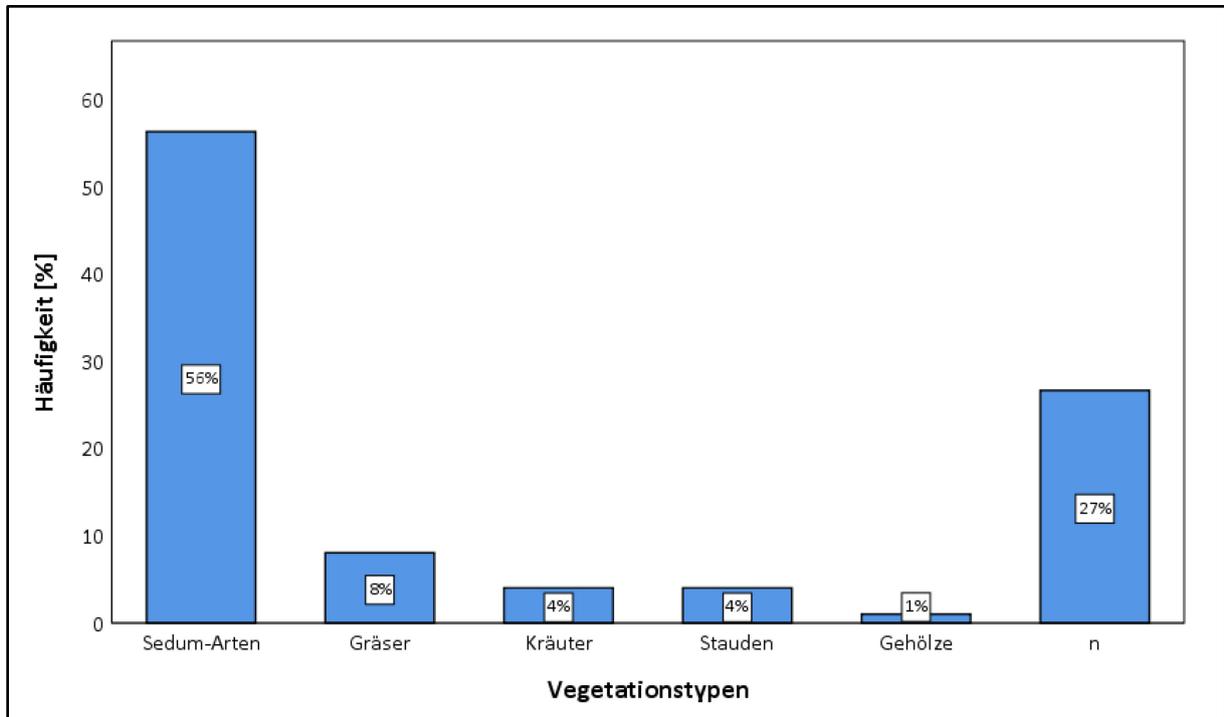


Abbildung 31: Anzahl der verwendeten Haupt-Vegetationstypen auf den untersuchten Dachbegrünungen, n: keine Angaben.

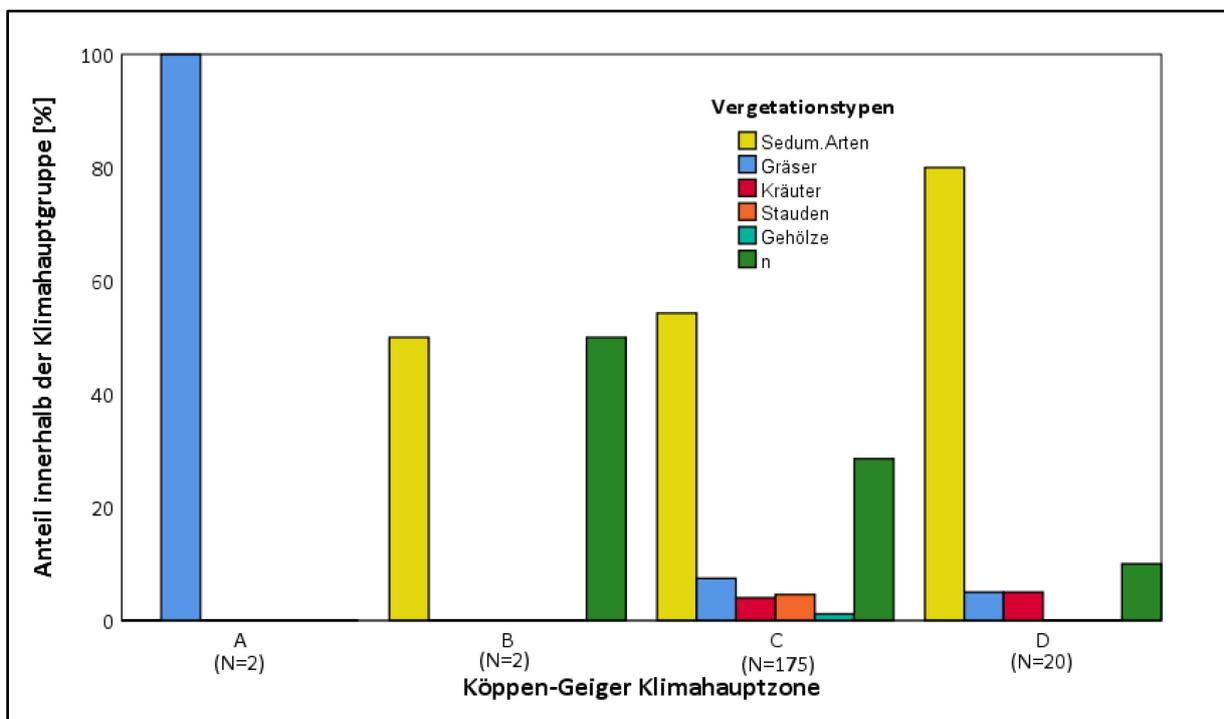


Abbildung 32: Prozentualer Anteil der Dachbegrünungen mit den Vegetationstypen Sedum, Gräser, krautige Pflanzen, Stauden und Gehölze innerhalb der Klimahauptgruppen der Köppen-Geiger Klassifikation. N entspricht der Anzahl der Dächer in den Klimahauptzonen.

Mehr als die Hälfte der Dachbegrünungen in den Studien war mit einer Drainageschicht ausgestattet (N = 114), die übrigen Dächer wurden ohne Drainage gebaut (N = 68) oder es wurde keine Angabe gemacht (N = 18). Die verschiedenen Typen wurden kategorisiert in mineralisch (z.B. Lava, Bims, Blähton, Schotter) und synthetisch hergestellt (z.B. Hart-Polyethylen, Polyethylen, Flies). Der Großteil der Drainageschichten war synthetischer Herkunft bzw. aus Kunststoff (N = 93).

3.2.4.2 Langfristiger Regenwasserrückhalt auf Dachbegrünungen

Saisonale Effekte

Um saisonale bzw. langfristige Regenwasserrückhaltung durch Dachbegrünungen zu ermitteln, haben eine Vielzahl von Studien langfristig Regen- und Abflussmengen von sowohl test-plots als auch realen Dachbegrünungen auf Gebäuden berichtet. Zuerst wird der Fokus auf Ergebnisse aus den saisonalen Betrachtungen gelegt, also auf Studienergebnisse, die mittlere Regenwasserrückhalte über die Monate Dezember, Januar und Februar (Winter) bzw. Juni, Juli und August (Sommer) untersuchten. Die den saisonalen Langzeit-Regenwasserrückhalt betrachtenden Studien befanden sich alle in den Klimahauptzonen oder Klimagürteln C (warmgemäßigtes Regenklima) und D (nordhemisphärisches, boreales Schneewaldklima) nach der Köppen-Geiger Klassifikation (Abbildung 24). In den box-plots wird eine Tendenz zu Unterschieden des mittleren saisonalen Wasserrückhalts deutlich (Abbildung 33).

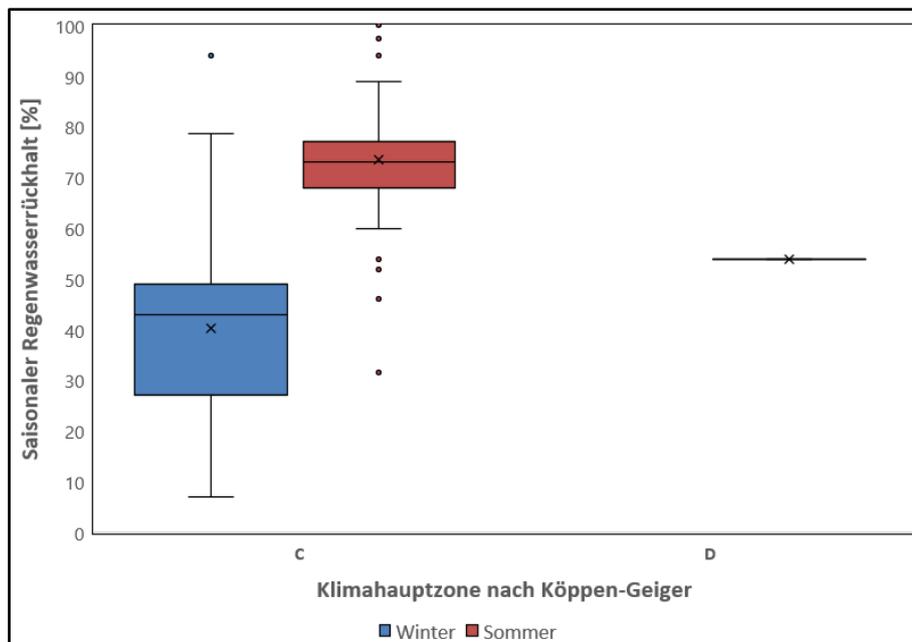


Abbildung 33: Regenwasserrückhalt auf Dachbegrünungen in unterschiedlichen Zeiträumen (Winter/Sommer), kategorisiert nach Klimahauptzonen nach der Köppen-Geiger Klimaklassifikation.

Diese sind mit Vorsicht zu betrachten und zu interpretieren, da die Anzahl der Datenpunkte in der Klimahauptgruppe D mit $N = 2$ im Sommer deutlich geringer ist als in der Hauptgruppe C mit $N = 70$ je Saison. Demzufolge wurde hier auch auf weitergehende Statistiken und Tests bezüglich der Unterschiede in den Mittelwerten oder Medianen verzichtet. Nichtsdestotrotz sollen hier die in den Daten gefundenen Unterschiede aufgezeigt werden. Während in den Sommermonaten in den untersuchten Studien im Mittel 73 % (Klimahauptzone C: 74 %; Klimahauptzone D: 54 %) des Regenwassers zurückgehalten wird sind es in den Wintermonaten 40 %. Dieser Effekt ist u.a. auf die verringerte Verdunstungsleistung in der kalten Jahreszeit zurückzuführen.

Effekte über Gesamt-Untersuchungszeiträume

Der Regenwasserrückhalt der gesamten Untersuchungszeiträume wird mittels prozentualem Regenwasserrückhalt angegeben (Anteil am Abfluss in Bezug auf Regenmenge des Gesamtzeitraums). Die Gesamtzeiträume beziehen sich auf die in der jeweiligen Studie angegebenen Messzeiträume, sind also nicht in allen Fällen mit Zeitreihen über ganze Jahre zu vergleichen. Die Länge der Messzeiträume ist sehr unterschiedlich, kann von einigen Wochen bis zu mehreren Jahren variieren. Beispielsweise wurden Regenmenge und Regenwasserrückhalt für den Gesamtzeitraum in Herrera et al. (2018) über die Jahre 2014-2015 angegeben, bei Kouhanestani et al. (2018) z.B. nur von Dezember 2015 bis Mai 2016. Das ist bei der Interpretation der folgenden Ergebnisse zu beachten. Um einen Anhaltspunkt für Zusammenhänge zwischen den Variablen zu gewinnen, wurde als erster Schritt eine **bivariate lineare Regression** des Regenwasserrückhalts mit unterschiedlichen technisch-konstruktiven und klimatisch-ökologischen Variablen bzw. Charakteristiken durchgeführt. Die Streudiagramme der Variablen mit den jeweiligen linearen Regressionsgeraden und Bestimmtheitsmaßen (R^2) sind in Abbildung 34 dargestellt. In den Streudiagrammen sind eher geringe (lineare) Zusammenhänge erkennbar, das bestätigt sich auch bei Betrachtung der meist sehr geringen Bestimmtheitsmaße R^2 . Diese geben an, wieviel % der beobachteten Varianz des Regenwasserrückhalts durch die Regressionsgleichung erklärt werden. Die einzige Ausnahme stellt hier die Beziehung der Dachneigung und des Regenwasserrückhalts dar. Ein R^2 von 0,169 bedeutet hier, dass 17 % der Varianz des Regenwasserrückhalts durch die Regressionsgleichung erklärt werden können. Die Schätzung der Irrtumswahrscheinlichkeit mit dem t-Test ergab ein sehr hohes Signifikanzniveau nahe 100 % ($p = 0,003$). Das bedeutet, die Wahrscheinlichkeit, dass der gefundene Zusammenhang rein zufällig ist, liegt unter 0,1 %. Der Regressionskoeffizient der Dachneigung ist hier auch positiv, was nicht zu erwarten war, da dies bedeutet, dass mit zunehmender Neigung mehr Regenwasser zurückgehalten würde. Wie allerdings im Streudiagramm (Abbildung 34b) auch zu sehen ist, scheint der Zusammenhang besonders durch zwei besonders hohe Neigungswerte (36% und 84%) mit einem sehr hohen Regenwasserrückhalt beeinflusst zu sein.

Technisch-konstruktive Charakteristiken

Klimatisch-ökologische Charakteristiken

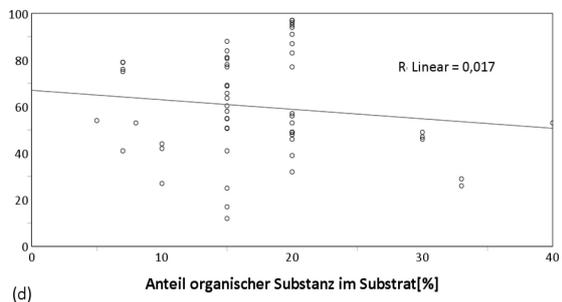
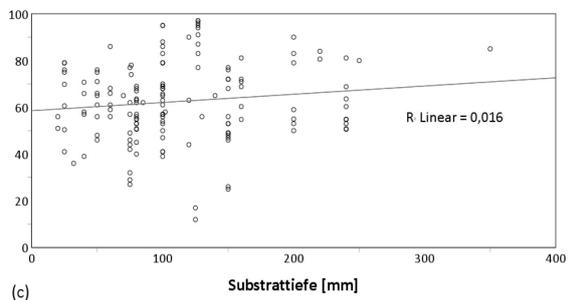
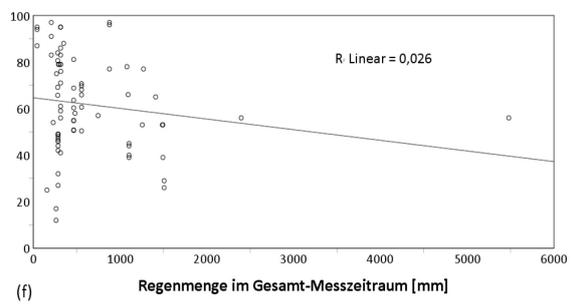
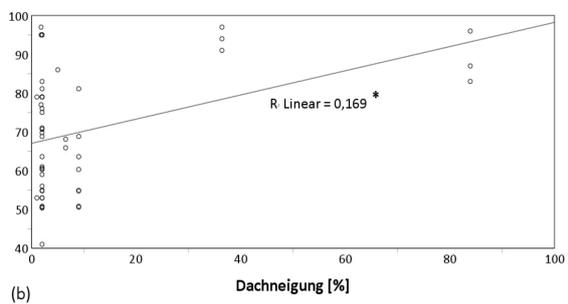
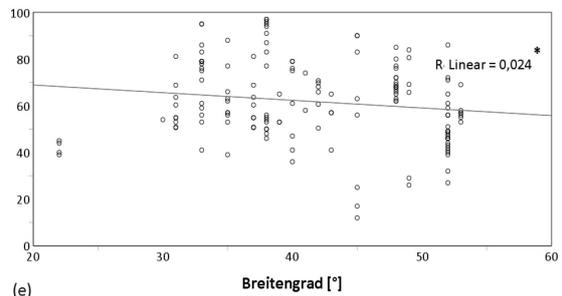
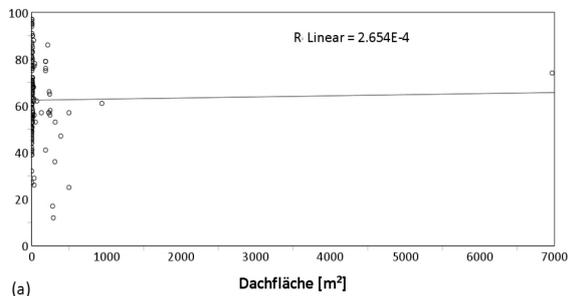


Abbildung 34: Streudiagramme des Regenwasserrückhalts in % über die gesamten Messzeiträume mit verschiedenen Variablen der technisch-konstruktiven und klimatisch-ökologischen Eigenschaften der Dachbegrünungsstudien. Eingetragen sind jeweils die linearen regressionsgeraden und das Bestimmtheitsmaß R^2 . Die Y-Achse der Diagramme stellt jeweils den Regenwasserrückhalt in % dar. Signifikante bivariate lineare Zusammenhänge sind mit * gekennzeichnet.

Diese stammen aus einer Studie von Murphy et al. (2018). Es könnte sich also um einen Scheinzusammenhang halten, der hier nicht weiter interpretiert wird. Ein ebenfalls hoch signifikanter linearer Zusammenhang ($p=0,055$) scheint zwischen den Absolutwerten der Breitengrade (Wert ohne Vorzeichen, also keine negativen Breitengrade) und dem Regenwasserrückhalt zu bestehen. Breitengrade wurden hier anstatt der Klimaklassifikationen nach Köppen-Geiger verwendet, da zur Regression numerische Variablen benötigt wurden. Dieser Zusammenhang würde bedeuten, dass mit zunehmender (absoluter) geographischer Breite ϕ , also zunehmender Entfernung zum Äquator, der langfristige Regenwasserrückhalt von Dachbegrünungen abnimmt. Das erscheint logisch, da in tropischen und subtropischen Regionen normalerweise höhere Verdunstungsraten zu schnellerer Austrocknung der Substrate führen können. Die weiteren Tests ergaben keine signifikanten linearen Zusammenhänge. Eine Tendenz zum positiven Zusammenhang schien es bei der Substrattiefe zu geben, also je mehr Substratauflage desto höher der Regenwasserrückhalt. Negative Zusammenhänge schien es zwischen der Regenmenge im Gesamtzeitraum und dem Anteil der Organischen Substanz im Substrat jeweils mit dem Regenwasserrückhalt zu geben (nicht signifikant).

Die **multiple lineare Regressionsanalyse** mit allen technisch-konstruktiven und klimatisch-ökologischen Variablen zeigte einen signifikanten Gesamtzusammenhang ($p = 0,000$) und ein hohes (korrigiertes) Bestimmtheitsmaß von $R^2= 0,771$. Auch hier zeigte die geographische Breite einen signifikanten Zusammenhang mit dem Regenwasserrückhalt, hinzu kommt ein signifikanter Zusammenhang mit dem Anteil der organischen Substanz (Tabelle 8). Aufgrund fehlender Korrelationen wurde die Dachfläche in der Analyse ausgeschlossen.

Tabelle 8: Koeffizienten der multiplen linearen Regressionsanalyse des langfristigen Regenwasserrückhalts mit unterschiedlichen Variablen in SPSS und deren Signifikanz (p-Wert).

	Regressionskoeffizient	p-Wert
Konstante	-451,733	,010
Dachneigung [%]	-,018	,835
Substrattiefe [mm]	,141	,090
Anteil org. Substanz [%]	3,520	,002
Breitengrad [°]	11,991	,012
Gesamt-Regenmenge	-,002	,821

Zusammenhänge bzw. Unterschiede zwischen dem Regenwasserrückhalt und kategorisierten (nicht-numerischen) Variablen wurden getestet und teilweise für signifikant befunden. Es wurden keine signifikanten Unterschiede in den Mittelwerten und Medianen des Regenwasserrückhalts in den Klimahauptgruppen nach Köppen-Geiger festgestellt.

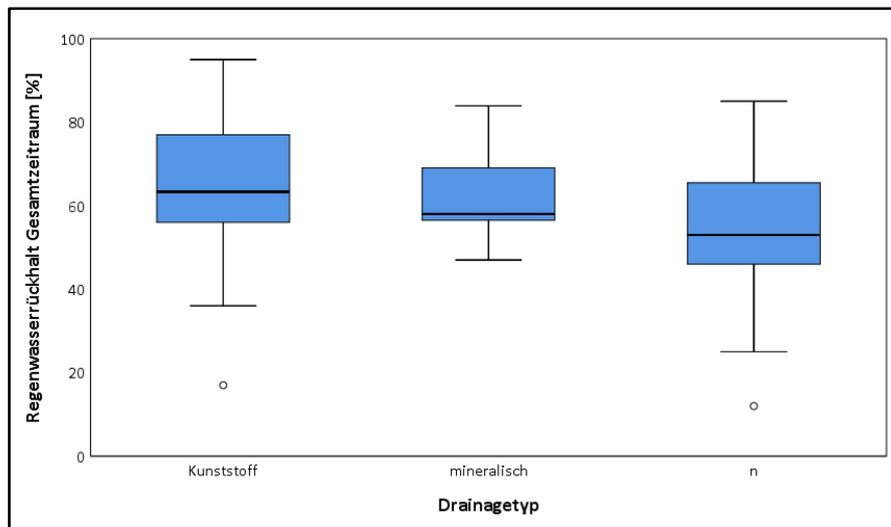


Abbildung 35: Box-and-whisker plots der unterschiedlichen Drainagetypen bzw. -materialien und deren Regenwasserrückhalte über die Gesamtzeiträume (n = ohne Drainage).

Im Falle der in den Studien verwendeten Drainagetypen (Abbildung 35) gab es nach der ANOVA keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mittelwerten des Regenwasserrückhalts bei den Dächern ohne Drainage (53,4 %), den Dächern mit Kunststoffdrainage (64,8 %) und mit mineralischer Drainage (63,1 %). Der Kruskal-Wallis-Test auf Unterschiede in den Medianen lieferte einen signifikanten Unterschied in den Gruppen mit Kunststoff- und ohne Drainage ($p=0,01$). Bezüglich der kategorisierten Variablen Vegetationstyp (Sedum, Gräser, Kräuter, Stauden, Sträucher) wurden mittels ANOVA (einfaktorielle Varianzanalyse), einem Hypothesentest zur Prüfung, ob sich Mittelwerte von mehr als zwei unabhängigen Stichproben voneinander unterscheiden, die Unterschiede in bezüglich der langfristigen Regenwasserrückhaltung zwischen den Gruppen Perennials (Stauden) und Sedum als signifikant nachgewiesen, jedoch keine Unterschiede in den Medianen. Die Unterschiede zwischen in den Werten zwischen Stauden und Sedum sind auch mit Vorsicht zu betrachten, da für Stauden nur ein Wert vorlag.

3.2.4.3 Regenwasserrückhalt von Einzel-Regenereignissen auf Dachbegrünungen

Analyse der Regenereignisse

Bei dem Großteil der Studien wurden eine Vielzahl von einzelnen Regenereignissen als Untersuchungsgrundlage verwendet, dadurch konnten insgesamt 1014 Regenereignisse in die Datenbank übertragen werden. Der Großteil dieser war im Bereich von Regenmengen bis 30 mm zu finden (Abbildung 36).

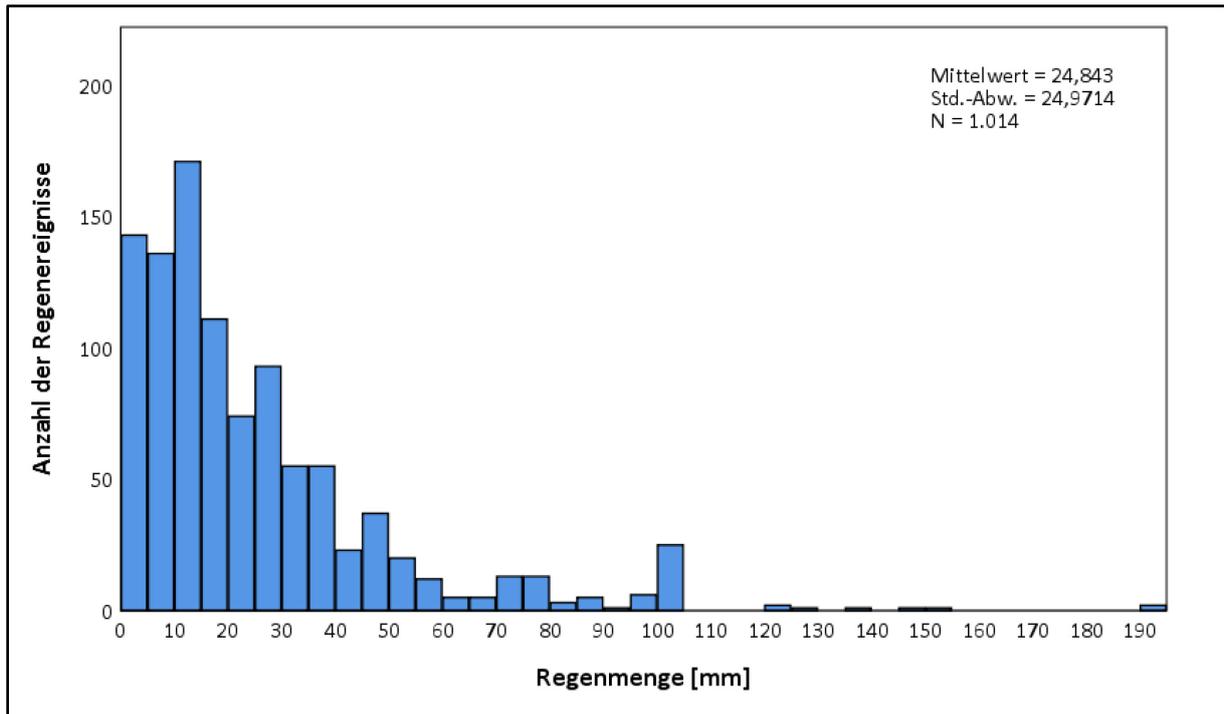


Abbildung 36: Histogramm der Regenmengen. Die Häufigkeiten der Regenereignisse in den einzelnen Klassen (Klassengröße = 5mm) ist an der X-Achse abzulesen.

Die Verteilung der Regenmengen pro Regenereignis spiegelte wiederum die typischen Regenereignisse in den gemäßigten Klimaten (Klimahauptgruppe C nach Köppen-Geiger) wieder, welche mit Abstand am meisten Datenpunkte lieferte (N = 854). Nach Anzahl an Regenereignissen folgten die Klimahauptgruppe D (N = 135), B (N = 17) und A (N = 8). In Abbildung 37 sind die Regenmengen in einem Box-and-Whisker-plot in den unterschiedlichen Klimahauptzonen dargestellt. Einerseits sind eine Vielzahl an Ausreißern und Extremwerten zu erkennen (Punkte bzw. Sterne oberhalb der Whisker), welche Starkregenereignisse repräsentieren könnten. Andererseits ist zu erkennen, dass sich die Regenmengen in den unterschiedlichen Klimaten unterschieden. Zumindest der Mittelwert der Regenmengen im tropischen Regenklimate (A; Mittelwert = 55,4 mm) lag deutlich über den Mittelwerten der Trockenklimate (B; 23,3 mm), der warmgemäßigten Regenklimate (C; 25,0 mm) und der borealen Klimate (D;

22,1 mm). Diese Unterschiede in den Mittelwerten wurden durch die einfaktorische Varianzanalyse (ANOVA) als signifikant ermittelt ($p = 0,003$). Auch die Mediane waren zumindest zwischen den Klimahauptgruppen C und D nach dem Kruskal-Wallis-Test signifikant unterschiedlich ($p = 0,042$). Der Kruskal-Wallis Test ist ebenfalls ein Hypothesentest, welcher den Unterschied zwischen Mittelwerten unterschiedlicher Datensätze bewertet, siehe Kapitel 2.3.2.

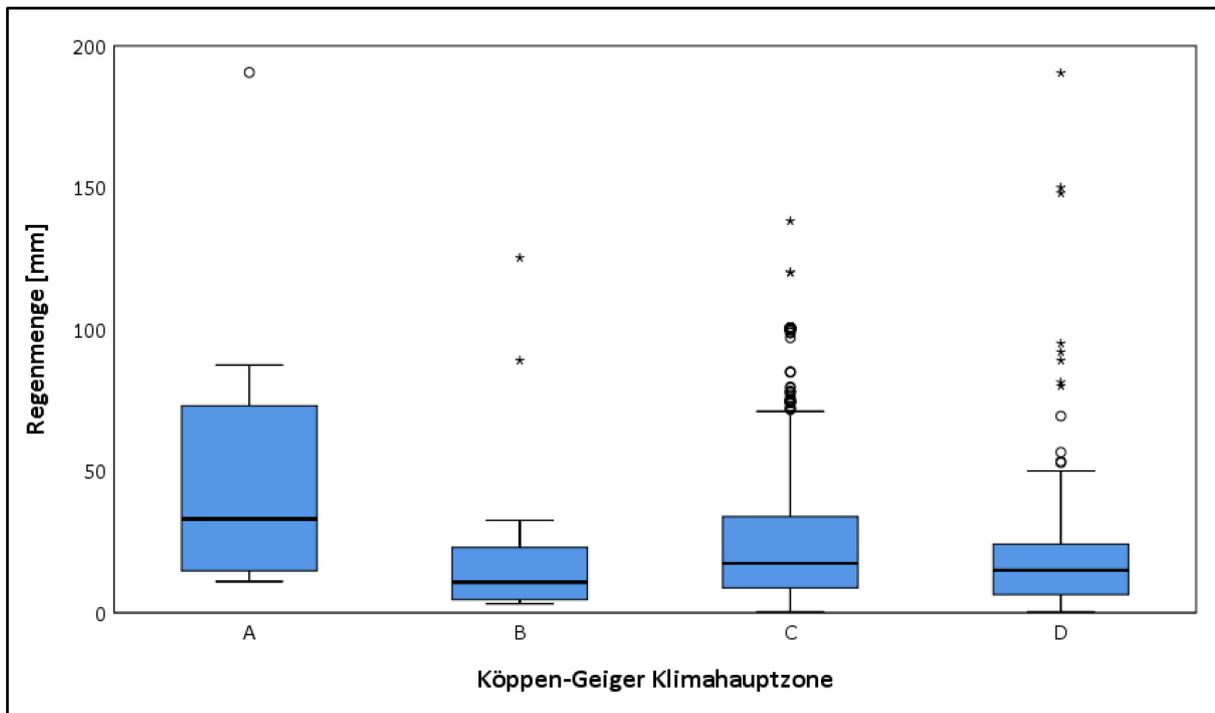


Abbildung 37: Box-and-Whisker-plot der Klimahauptzonen nach Köppen-Geiger und deren Regenmengen pro Einzelereignis in der Datenbank.

Deskriptive Statistiken der Variablen des Regenwasserrückhalts

Im Folgenden werden deskriptive Statistiken verschiedener Variablen, die den Regenwasserrückhalt beschreiben, betrachtet (Tabelle 9). Als solche Variable wurde in den meisten Studien der gesamte Rückhalt bzw. Abfluss von Regenwasser im Vergleich zur Gesamt-Regenmenge angegeben. Als Kennzahl dafür wird hier der prozentuale Regenwasserrückhalt verwendet. Weitere Faktoren, die in einigen Studien angegeben wurden und auch als Eigenschaft des Regenwasserrückhalts in dieser Analyse Betrachtung finden, sind der Spitzenabflussbeiwert Ψ_s (Quotient der maximalen Abflussspende und der maximalen Regenspende, siehe 1.3.2 und Abbildung 2) und die zeitliche Verzögerung des Abflusses und der Abflussmaxima. Gemeint ist in diesen Fällen der zeitliche Unterschied zwischen Beginn des Regens und des gemessenen Abflusses vom Gründach und zwischen Auftreten der maximalen Regen- und Abflussintensität. Im Mittel wurde von allen übertragenen Regenereignissen etwa 60% zurückgehalten und der mittlere Spitzenabflussbeiwert Ψ_s lag bei 0,37. Die mittlere zeitliche Verzögerung des

Abflussbeginns (235 min) und des Abflussmaximums gegenüber dem Regenmaximum (250 min) befanden sich in einer ähnlichen Größenordnung von etwa 4 Stunden. Die jeweiligen Werte der Faktoren des Regenwasserrückhalts befinden sich in sehr weiten Bereichen, haben also eine sehr breite Streuung von Minimum und Maximum.

Tabelle 9: Deskriptive Statistiken unterschiedlicher Faktoren des Regenwasserrückhalts aller in die Datenbank übertragener Regenereignisse.

	N	Mini- mum	Maximum	Mittel- wert	Std.-Abwei- chung
Regenwasserrückhalt [%]	1012	0,00	100,00	59,73	30,41
Spitzenabflussbeiwert C_s	316	0,00	1,33	0,37	0,29
Verzögerung Abflussbeginn [min]	172	-8	2290	234,57	411,97
Verzögerung Abflussmaximum [min]	89	1	2000	249,52	436,37

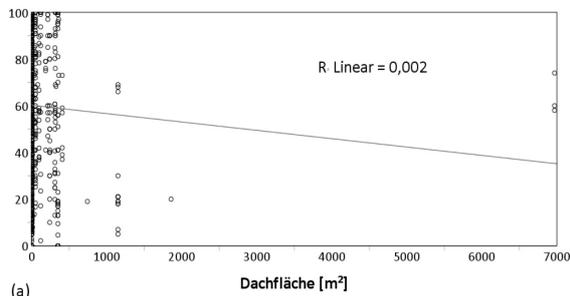
Analyse der Zusammenhänge von Untersuchungsdesigns und prozentualem Regenwasserrückhalt

Im Folgenden werden eventuelle Zusammenhänge von technisch-konstruktiven Ausgestaltungen von Dachbegrünungen und ökologischen bzw. klimatischen Charakteristiken der jeweiligen Studien und deren Auswirkungen auf den Regenwasserrückhalt betrachtet. Parameter, die als technisch-konstruktiv betrachtet wurden und das hydrologische Verhalten von Dachbegrünungen beeinflussen könnten, sind die Größe der Dachfläche und die Neigung, die Stärke der Substratauflage, der Anteil der organischen Substanz im Substrat und das Vorhandensein einer mineralischen oder synthetischen Drainage. Klimatisch-ökologische Charakteristiken sind Faktoren, welche die klimatischen Verhältnisse bestimmen wie Breitengrad, Klimaklassifikation und Faktoren, die das jeweilige Regenereignis bzw. dessen Zustand charakterisieren wie Regenmenge, Regendauer und ADWP. Hinzu kommt die Unterscheidung in Vegetationstypen, welche das Abflussverhalten u.a. durch Interzeption und Verdunstung beeinflussen können.

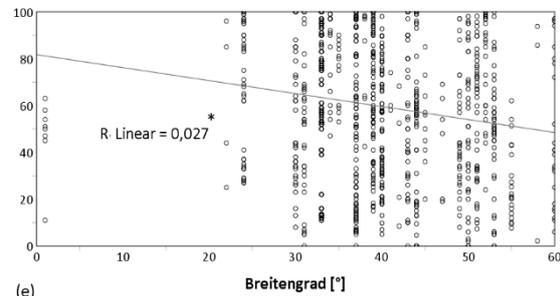
Streudiagramme und **bivariate lineare Regressionanalysen** geben hier wieder Hinweise auf Zusammenhänge zwischen Regenwasserrückhalt [%] und numerischen Variablen des Untersuchungsdesigns (Abbildung 38).

Technische Charakteristiken

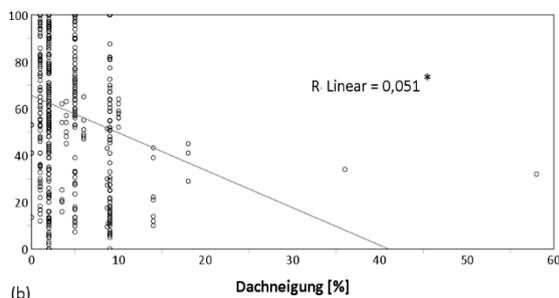
Klimatisch-ökologische Charakteristiken



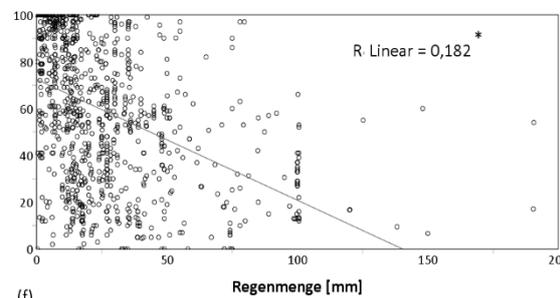
(a)



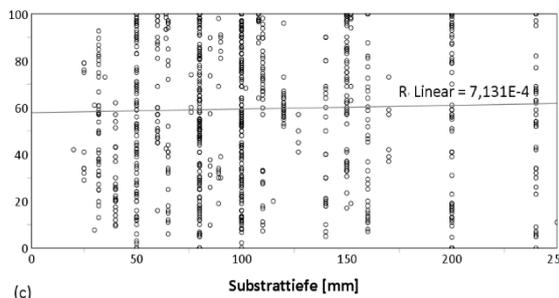
(e)



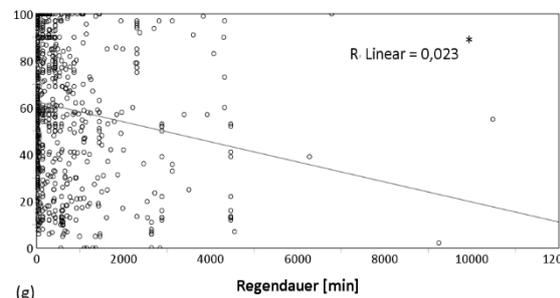
(b)



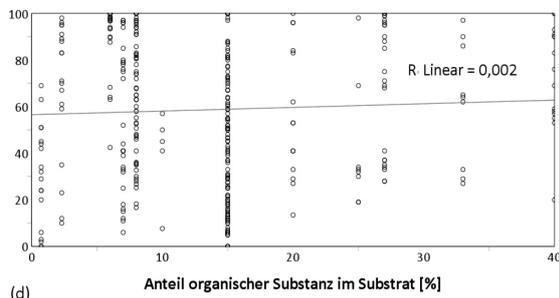
(f)



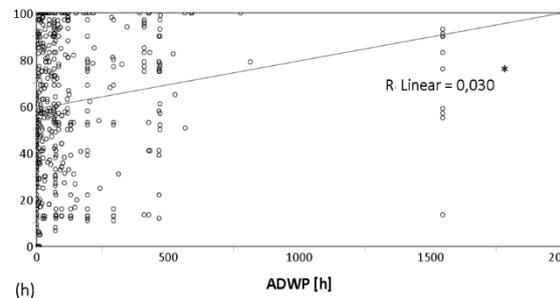
(c)



(g)



(d)



(h)

Abbildung 38: Streudiagramme des Regenwasserrückhalts für einzelne regenereignisse mit verschiedenen Variablen der technisch-konstruktiven und klimatisch-ökologischen Eigenschaften der Dachbegrünungsstudien. Eingetragen sind jeweils die linearen regressionsgeraden und das Bestimmtheitsmaß R^2 . Die Y-Achse der Diagramme stellt jeweils den Regenwasserrückhalt in % dar. Signifikante bivariate lineare Zusammenhänge sind mit * gekennzeichnet.

Wie bei der Betrachtung der langfristigen Regen- und Abflussereignisse schien auch hier ein signifikanter linearer Zusammenhang ($p = 0,000$) zwischen der Dachneigung und dem Regenwasserrückhalt zu

bestehen. In diesem Fall, also bei dem kurzfristigen Regenwasserrückhalt, hat die Dachneigung den zu erwartenden Effekt, je höher die Neigung desto geringer der Regenwasserrückhalt. Weitere Abhängigkeiten von technischen Charakteristiken schienen nicht signifikant zu sein, zeigten aber jeweils die erwarteten Tendenzen. Die bivariaten linearen Zusammenhänge zwischen kurzfristigem Regenwasserrückhalt von Einzelereignissen und allen klimatisch-ökologischen Charakteristiken waren alle als signifikant einzustufen. Demnach ist ein insgesamt höherer Regenwasserrückhalt zu erwarten in niedrigeren (absoluten) Breitengraden, bei geringeren Regenmengen und –Dauern und längerer Trockenzeit (ADWP) vor dem Regenereignis. Der statistisch relevanteste bzw. stärkste lineare bivariate Zusammenhang bestand mit der Regenmenge mit dem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,182$.

Im Rahmen der **multiplen linearen Regressionsanalyse** mit allen technisch-konstruktiven und klimatisch-ökologischen Variablen wurden aufgrund fehlender Korrelationen die Faktoren Dachfläche, Dachneigung, Substrattiefe, Anteil organischer Substanz und Breitengrad aus der Analyse gelöscht. Das lineare Modell besteht also nur aus Faktoren, die das jeweilige Regenereignis bzw. die Vorbedingungen charakterisieren (Tabelle 10). Es zeigt einen signifikanten Gesamtzusammenhang und ein (korrigiertes) Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,676$.

Tabelle 10: Koeffizienten der multiplen linearen Regressionsanalyse des langfristigen Regenwasserrückhalts mit unterschiedlichen Variablen in SPSS und deren Signifikanz (p-Wert).

	Regressionskoeffizient B	p-Wert
(Konstante)	80,467	0,000
Regenmenge [mm]	-0,621	0,001
Regendauer [min]	-0,471	0,171
ADWP [h]	0,043	0,000

Das lineare Modell für die Bestimmung des Regenwasserrückhalts würde also von folgender Formel beschrieben werden:

$$\begin{aligned} \text{Regenwasserrückhalt [\%]} \\ = 80,467 - 0,621 \times \text{Regenmenge} - 0,471 \times \text{Regendauer} + 0,043 \times \text{ADWP} \end{aligned}$$

In verschiedenen klimatischen Regionen sind in den box-plots Unterschiede hinsichtlich Regenwasserrückhalt zu erkennen (Abbildung 39). Die Mittelwerte der Retention von Regenwasser bei Einzelregenereignissen waren mit 47,4 % (Klimahauptzone A; N = 8), 80,8 % (B; N = 17), 59,0 % (C; N = 850) und 62,1 % (D; N = 137) zumindest im Falle der Klimahauptzone B deutlich unterschiedlich, was auch mittels ANOVA als signifikant nachgewiesen wurde ($p = 0,013$). Der Kruskal-Wallis-Test lieferte zumindest im Falle der Unterschiede der Mediane der Klimahauptzonen A zu B und B zu C signifikante Werte ($p = 0,037$ bzw. $p = 0,018$). Das heißt, dass in Klimahauptzone B (trockene Klimate) im Mittel signifikant mehr Regenwasser auf Dachbegrünungen zurückgehalten wurde.

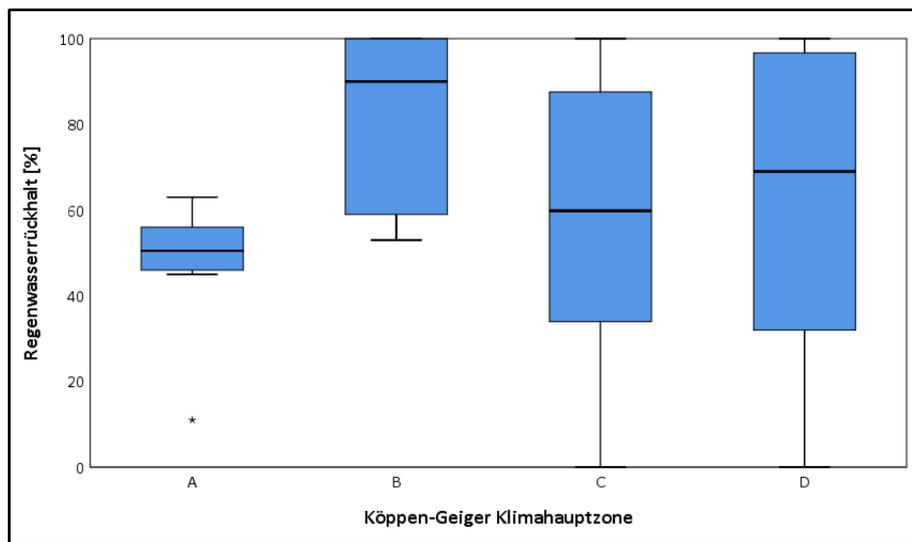


Abbildung 39: : Box-and-Whisker-plot der Klimahauptzonen nach Köppen-Geiger und deren prozentualer Regenwasserrückhalt der Dachbegrünungen pro Einzelregenereignis in der Datenbank.

Keine signifikanten Unterschiede wurden in den Mittelwerten des Regenwasserrückhalts bezüglich der Drainagetypen Kunststoff (60,1%; N = 544), mineralisch (55,7%, N = 69) und ohne Drainage (63,8%, N = 111) detektiert, das traf auch auf die Mediane zu. Unterschiede im Retentionsverhalten sind auch aufgrund des Bewuchs zu erwarten. Kein eindeutiges Bild ist allerdings beim Vergleich der Vegetationstypen zu erkennen (Abbildung 40). Bei allen Vegetationstypen ist der Regenwasserrückhalt in einem großen Bereich verteilt, bei nahe 0 bis 100%, außer bei den Gehölzen. Die Mittelwerte der Gruppen liegen bei 61,4% (Sedum, N = 634), 54,1% (Gräser, N = 58), 62,0% (Kräuter, N = 111), 48,5% (Stauden, N = 28), 79% (Gehölze, N = 3) und 55,8% (n, N = 178). Nach der ANOVA sind die Mittelwerte voneinander signifikant unterschiedlich ($p = 0,028$), die Mediane sind nicht signifikant voneinander unterschiedlich. Die signifikanten Ergebnisse beziehen sich hier allerdings hauptsächlich auf den Unterschied der Sträucher zu den anderen Gruppen. Die Aussage ist jedoch zu hinterfragen, da nur eine geringe Anzahl an Werten (N = 3) den Mittelwert der Gruppe bestimmt.

Keine signifikanten Unterschiede in Mittelwerten oder Medianen der Retention wurden bezüglich des experimentellen set-ups, also Nutzung von realen Dächern oder test-plots, festgestellt.

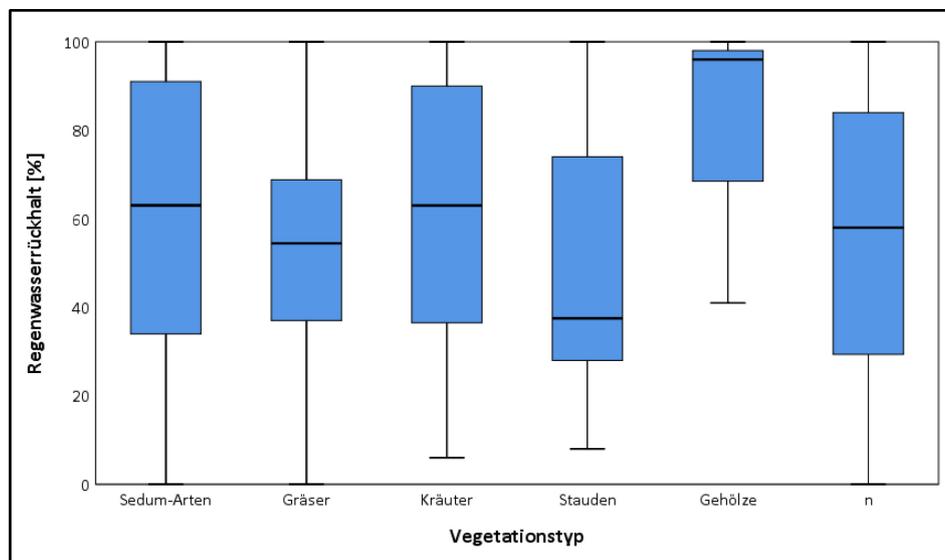


Abbildung 40: Box-and-Whisker-plot der Vegetationstypen und deren prozentualer Regenwasserrückhalt der Dachbegrünungen pro Einzelregenereignis in der Datenbank (n = ohne Bewuchs).

Analyse der Zusammenhänge von Untersuchungsdesigns und Spitzenabflussbeiwert C_s

Im Folgenden werden eventuelle Zusammenhänge von technisch-konstruktiven Ausgestaltungen von Dachbegrünungen und ökologischen bzw. klimatischen Charakteristiken der jeweiligen Studien und deren Auswirkungen den Spitzenabflussbeiwert betrachtet (siehe auch vorangehenden Abschnitt). Streudiagramme und **bivariate lineare Regressionanalysen** geben hier wieder erste Hinweise auf eventuelle (lineare) Zusammenhänge zwischen Spitzenabflussbeiwert und den numerischen Variablen des Untersuchungsdesigns (Abbildung 41). Am deutlichsten scheint in dem Fall der abnehmende Spitzenabflussbeiwert bei höherer Substratauflage ($p = 0,000$). Weitere signifikante lineare Zusammenhänge des Spitzenabflussbeiwerts schienen mit der Dachneigung, dem Anteil der organischen Substanz, der Regenmenge und der Länge der Trockenperiode (ADWP) zu bestehen. Ungewöhnlich bzw. unerwartet waren hier die Richtungen der Zusammenhänge bei Dachneigung und organischer Substanz. Bei der Dachneigung tendierte der Spitzenabflussbeiwert bei höheren Dachneigungen kleiner zu sein, also bei steileren Dächern würden demnach die Abflussspitzen stärker verringert werden als bei flacheren Dächern. Bei der organischen Substanz tendierte der Spitzenabflussbeiwert zu geringeren Werten bei wenig Organik im Substrat. Beide Sachverhalte würde man aufgrund der Literaturangaben anders erwarten.

Technische Charakteristiken

Klimatisch-ökologische Charakteristiken

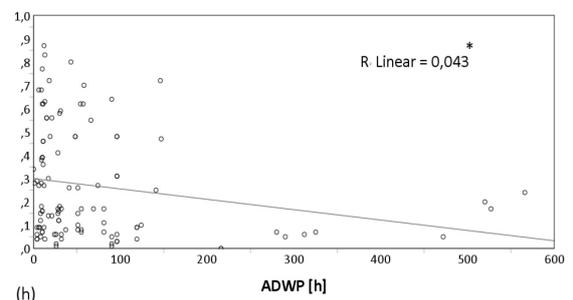
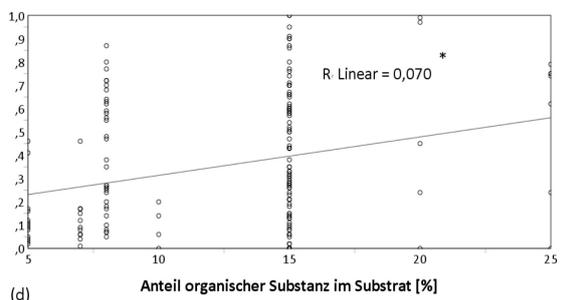
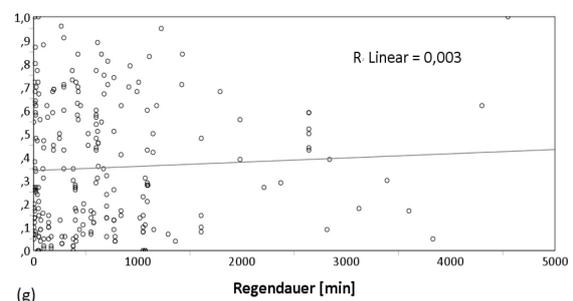
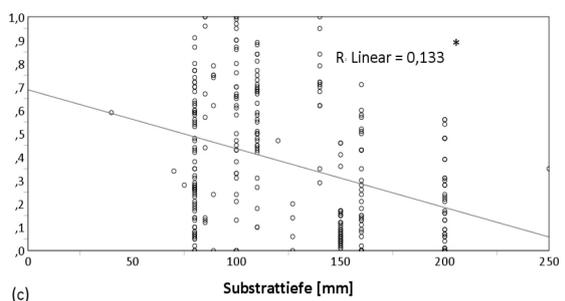
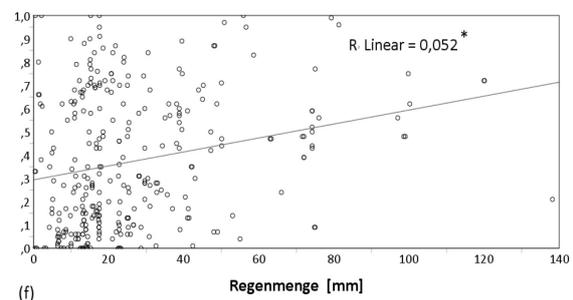
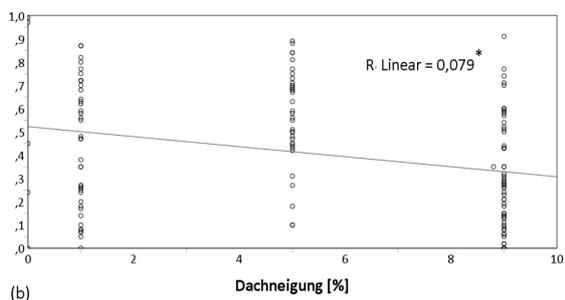
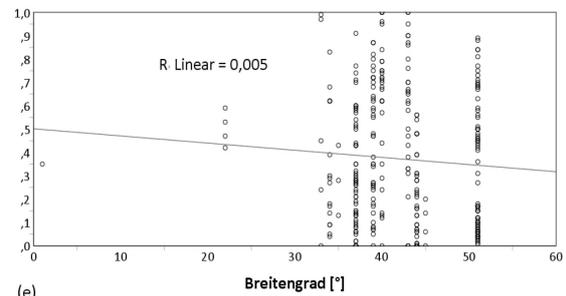
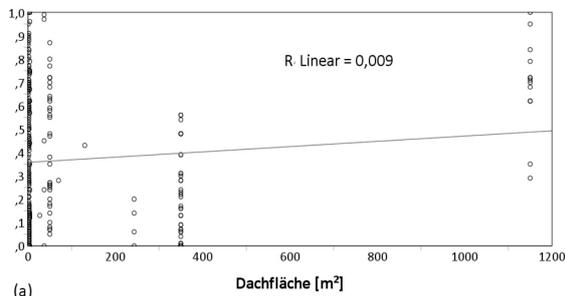


Abbildung 41: Streudiagramme der Spitzenabflussbeiwerte für einzelne regenereignisse mit verschiedenen Variablen der technisch-konstruktiven und klimatisch-ökologischen Eigenschaften der Dachbegrünungsstudien. Eingetragen sind jeweils die linearen regressionsgeraden und das Bestimmtheitsmaß R^2 . Die Y-Achse der Diagramme stellt jeweils den Spitzenabflussbeiwert dar. Signifikante bivariate lineare Zusammenhänge sind mit * gekennzeichnet.

Auch am Beispiel des Spitzenabflussbeiwerts wurden im Rahmen der **multiplen linearen Regressionsanalyse** aufgrund fehlender Korrelationen die Faktoren Dachfläche, Dachneigung, Substrattiefe, Anteil

organischer Substanz und Breitengrad aus der Analyse gelöscht. Das lineare Modell besteht also nur aus Faktoren, die das jeweilige Regenereignis bzw. die Vorbedingungen charakterisieren (Tabelle 11). Es zeigt einen signifikanten Gesamtzusammenhang und ein (korrigiertes) Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,385$.

Tabelle 11: Koeffizienten der multiplen linearen Regressionsanalyse des Spitzenabflussbeiwerts mit unterschiedlichen Variablen in SPSS und deren Signifikanz (p-Wert).

	Regressions- koeffizientB	p-Wert
Konstante	0,397	0,000
Regenmenge [mm]	0,007	0,024
Regendauer [min]	-0,005	0,357
ADWP [h]	-0,001	0,001

Das lineare Modell für die Bestimmung des Spitzenabflussbeiwerts würde also von folgender Formel beschrieben werden:

$$\Psi_S = 0,397 + 0,007 \times \text{Regenmenge} - 0,005 \times \text{Regendauer} - 0,001 \times \text{ADWP}$$

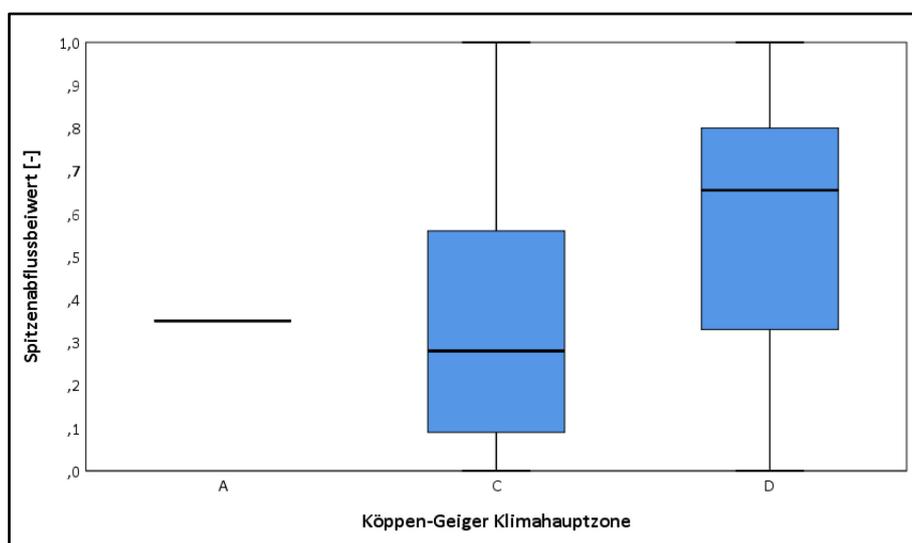


Abbildung 42: Box-and-Whisker-plot der Klimahauptzonen nach Köppen-Geiger und deren Spitzenabflussbeiwerte der Dachbegrünungen pro Einzelregenereignis in der Datenbank.

Auch bei den Mittelwerten ($p = 0,000$) und Medianen ($p = 0,000$ für C-D) von Ψ_S zeigte sich den verschiedenen klimatischen Regionen signifikante Unterschiede (Abbildung 42). Die Mittelwerte der Spitzenabflussbeiwerte waren mit 0,35 (Klimahauptzone A; $N = 1$), 0,34 (C; $N = 269$) deutlich geringer als

0,59 in Hauptgruppe D (N = 46). Für die Hauptgruppe B (trockene Klimate) lagen keine Daten für Spitzenabflussbeiwerte vor. Das heißt, dass die Reduktion der Abflussspitzen in Klimahauptzone D (boreale oder Schnee-Wald-Klimate) im Mittel signifikant geringer war als in den tropischen (A) und warm-gemäßigten Klimaten (C).

Signifikante Unterschiede in der Performance hinsichtlich Kappung der Abflussspitzen waren auch hinsichtlich der Drainagetypen zu erkennen (Abbildung 43). Sowohl der Mittelwertvergleich mittels ANOVA ($p = 0,000$) als auch der Vergleich der Mediane mittels Kruskal-Wallis-Test lieferte signifikante Ergebnisse ($p = 0,013$, mineralisch-Kunststoff). Die Mittelwerte für C_s lagen bei 0,29 (Kunststoff, N = 132), 0,42 (mineralisch, N = 60) und 0,23 (n, N = 46).

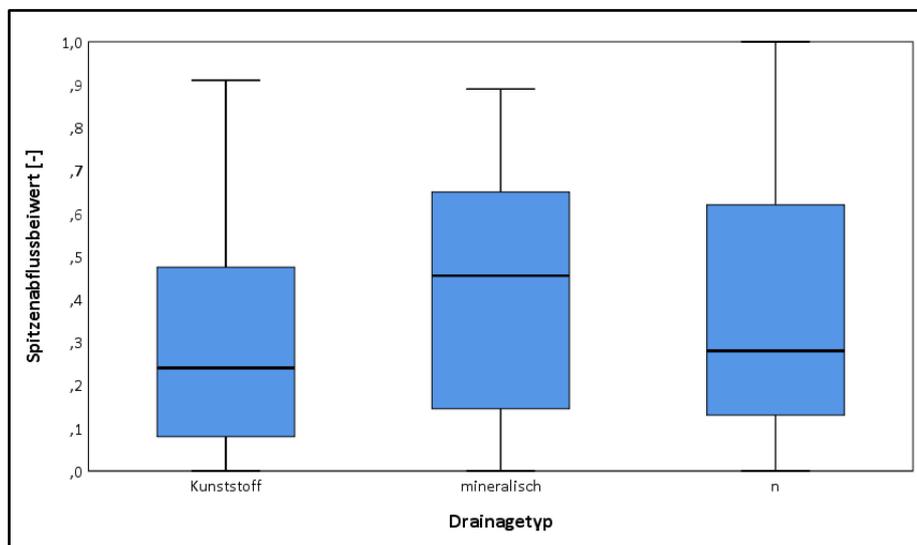


Abbildung 43: Box-and-Whisker-plot der Drainagetypen bzw. -materialien und deren Spitzenabflussbeiwerte der Dachbegrünungen pro Einzelregenereignis in der Datenbank (n = ohne Drainage).

Die Mittelwerte der Spitzenabflussbeiwerte der unterschiedlichen Vegetationstypen lagen bei 0,44 (Sedum, N = 156), 0,14 (Gräser, N = 14), 0,36 (Kräuter, N = 63), 0,5 (Stauden, N = 4) und 0,27 (n, N = 79). Nach der ANOVA waren die Mittelwerte voneinander signifikant unterschiedlich ($p = 0,000$), die Mediane waren zwischen den Gruppen Gräser-Sedum ($p = 0,08$) und Unbewachsen-Sedum ($p = 0,04$) signifikant unterschiedlich. Wie auch in Abbildung 44 zu sehen schienen insbesondere Dachbegrünungen mit Gräsern deutliche Reduzierung der Abflussspitzen zusätzlich zu fördern. Keine signifikanten Unterschiede in Mittelwerten oder Medianen der Spitzenabflussbeiwerte wurden bezüglich des experimentellen set-ups, also Nutzung von realen Dächern oder test-plots, festgestellt.

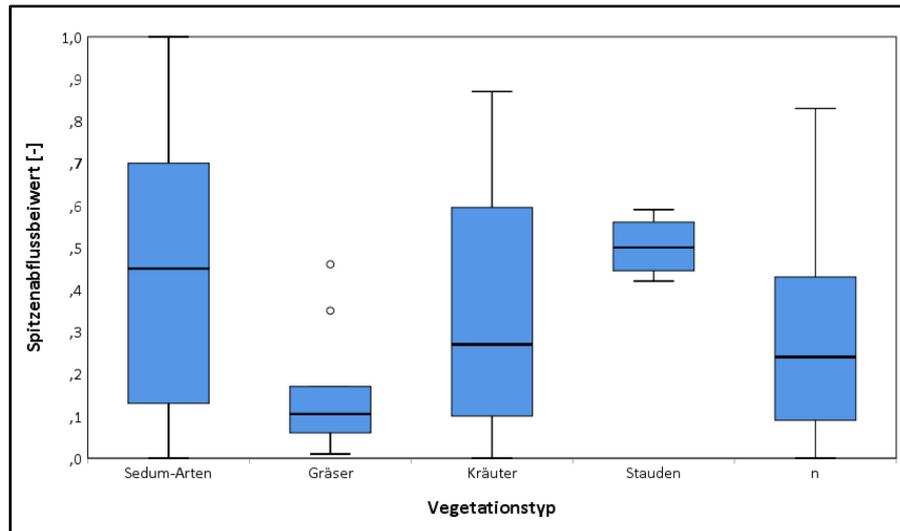


Abbildung 44: Box-and-Whisker-plot der Vegetationstypen und deren Spitzenabflussbeiwerte der Dachbegrünungen pro Einzelregenereignis in der Datenbank (n = ohne Bewuchs).

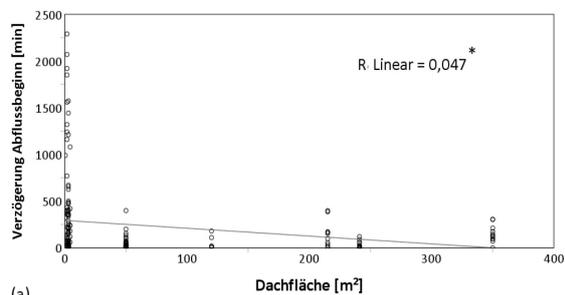
Analyse der Zusammenhänge von Untersuchungsdesigns und zeitlicher Verzögerung des Regenwasserabflusses

Im Folgenden werden eventuelle lineare Zusammenhänge wie in den vorangegangenen Abschnitten untersucht. Die Faktoren, die in diesem Abschnitt bezüglich des Regenwassermanagements untersucht werden, sind die zeitliche Verzögerung des Abflussbeginns im Gegensatz zum einsetzenden Regen und die Verzögerung des Abflussmaximums im Gegensatz zum Regenmaximum. Da sich aus den Studien für diese Faktoren deutlich weniger Daten übertragen ließen werden im Folgenden nur signifikante Zusammenhänge beschrieben bzw. abgebildet (Abbildung 45).

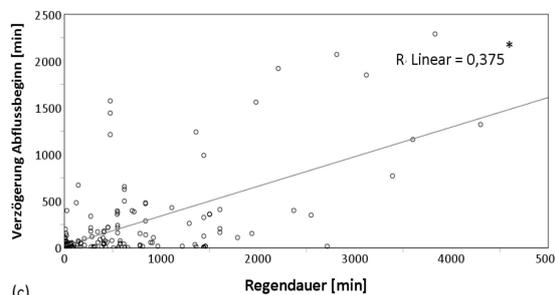
Streudiagramme und **bivariate lineare Regressionanalysen** geben hier wieder erste Hinweise auf signifikante (lineare) Zusammenhänge zwischen den zeitlichen Verzögerungen und den numerischen Variablen des Untersuchungsdesigns. Lineare Zusammenhänge mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit <5 % bestanden für die Verzögerung des Abflussbeginns mit der Dachfläche und der Regendauer, für die Verzögerung der Abflussmaxima mit dem Anteil organischer Substanz im Substrat und ebenfalls der Regendauer. Bei den Zusammenhängen mit negativen Regressionskoeffizienten für Dachfläche und Anteil organischer Substanz könnte es sich jedoch um Scheinkorrelationen handeln. Aufgrund der insgesamt wenigen Werte wurden die Fälle mit den sehr hohen bzw. langen Verzögerungen, die nur durch einige wenige Studien bestimmt sind, besonders hoch gewichtet und können die Aussage verfälschen. Im Falle der Regendauern erscheint der deutliche Zusammenhang jedoch sinnvoll. Die Verzögerung für Abflussbeginn und –maxima wurden größer je länger das Regenereignis dauerte. Wenn man bedenkt, dass die Intensität des Regens bei längeren Ereignissen normalerweise geringer ist, dauert es in den Fällen länger, bis das Substrat einen Sättigungswert erreicht und der Abfluss einsetzt.

Technische Charakteristiken

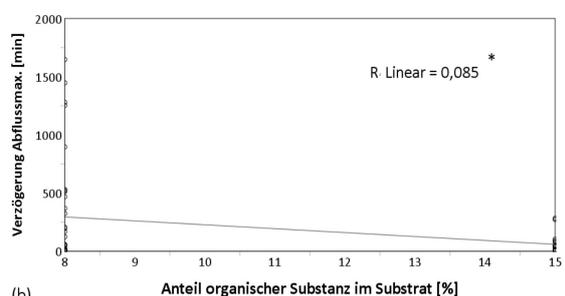
Klimatisch-ökologische Charakteristiken



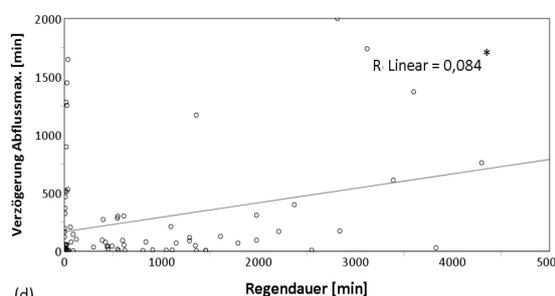
(a)



(c)



(b)



(d)

Abbildung 45: Streudiagramme der Verzögerung des Abflussbeginns (a, c) und der Verzögerung des maximalen Abflusses gegenüber der maximalen regenintensität (b, d) für einzelne regenereignisse mit verschiedenen Variablen der technisch-konstruktiven und klimatisch-ökologischen Eigenschaften der Dachbegrünungsstudien. Eingetragen sind jeweils die linearen regressionsgeraden und das Bestimmtheitsmaß R^2 . Signifikante bivariate lineare Zusammenhänge sind mit * gekennzeichnet.

Im Rahmen der **multiplen linearen Regressionsanalyse** wurden die Zusammenhänge zwischen Abflussverzögerung und Verzögerung der Abflussmaxima und den verschiedenen Faktoren als nicht signifikant eingestuft. Auch bei den Mittelwerten und Medianen der Verzögerungen in verschiedenen klimatischen Regionen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

In den weiteren, wie in vorherigen Abschnitten analysierten Gruppen, Drainagetypen, Vegetationstypen und experimentelles set-up wurden teilweise signifikante Unterschiede in Mittelwerten und Medianen festgestellt. Bei genauer Betrachtung der Daten wurde allerdings deutlich, dass diese Unterschiede hauptsächlich auf die besonders hohen Werte für Verzögerungen in nur einer Studie (Razzaghmanesh und Beecham 2014) zurückzuführen sind, die besonders viele Wertepaare bzw. Datenpunkte lieferte. Dadurch wird die Aussage zu den Signifikanzen verzerrt und hier nicht dargestellt.

3.2.5 Stadtklimatische Effekte Dachbegrünung und beeinflussende Faktoren

3.2.5.1 Untersuchungsdesign der Studien zur Beeinflussung stadtklimatischer Effekte durch Dachbegrünungen

In den 41 Artikeln bzw. Studien, die sich mit der UHI-Beeinflussung durch Dachbegrünungen befassten, wurden insgesamt 96 unterschiedliche Dächer bzw. Dachkonfigurationen mittels Messungen oder Modellierungen untersucht. Insgesamt konnten somit 169 Datenpunkte in die Datenbank übernommen werden. Nur ein kleiner Anteil der Untersuchungen wurde mittels direkter Messungen an realen gebauten Dachbegrünungen durchgeführt (12 Dächer/16 Datenpunkte, ca. 10%), siehe auch Abbildung 46a. Die am häufigsten genutzten numerischen Modelle zur Untersuchung von z.B. Temperaturänderungen auf verschiedenen klimatischen Skalen (mikro-, mesoklimatisch) waren ENVI-MET und das Weather Research and Forecasting Model WRF (Abbildung 46a). Die Untersuchungen mit Messungen wurden für räumlich kleinere Bereiche bzw. Skalen durchgeführt, also auf der räumlichen Ebene von Gebäuden oder Straßenschluchten. Größere Skalen wurden und können nur mittels Modellierungen durchgeführt werden. Insgesamt überwiegen Untersuchungen auf den Skalenebenen von Quartieren, also mehreren Gebäuden, oder auf gesamtstädtischer Ebene (Abbildung 46b).

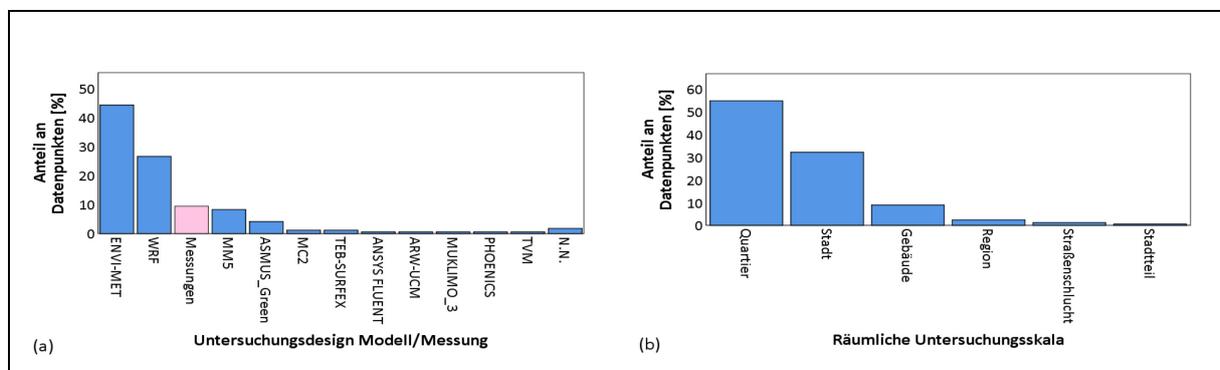


Abbildung 46: Histogramme der Untersuchungsdesigns bezüglich Modellierungen (Modelltyp)/Messungen und der räumlichen Ebene der Untersuchungen.

Der überwiegende Teil der Modellierungen und Messungen wurde an Extensivgründächern durchgeführt (71 % der Daten), Intensivdächer lieferten 27 % der Daten und der Rest waren blue-green roofs, also Retentionsdächer, und Dächer mit hydroponischen Systemen. Bei 22 % der Datenpunkte (37 von 169) wurden keine Angaben zum Dachbegrünungstyp gemacht. Substratstärken wurden nur in wenigen Fällen angegeben, nur bei etwa 20 % der Daten liegen Werte vor. Bei den abgegebenen Werten wurden Modellierungen hauptsächlich mit Substratstärken von 300 mm und Messungen mit Substratstärken von 35-350 mm durchgeführt. In einigen Fällen wurde ein Maß für die Blattflächen des Bewuchses angegeben, da dies einen Einfluss auf das Verdunstungsvermögen der Pflanzen hat. Die Werte

lagen meist bei einer Blattflächendichte von 1-1,5 m²/m³. Die Vegetationstypen wurden bei der Mehrheit der Studien (53 %) nicht angegeben (Abbildung 47). In den Fällen, in denen sie angegeben wurden, dominieren Gräser. Auch Bäume sind in den Studien häufiger genutzt worden als Sedum-Arten.

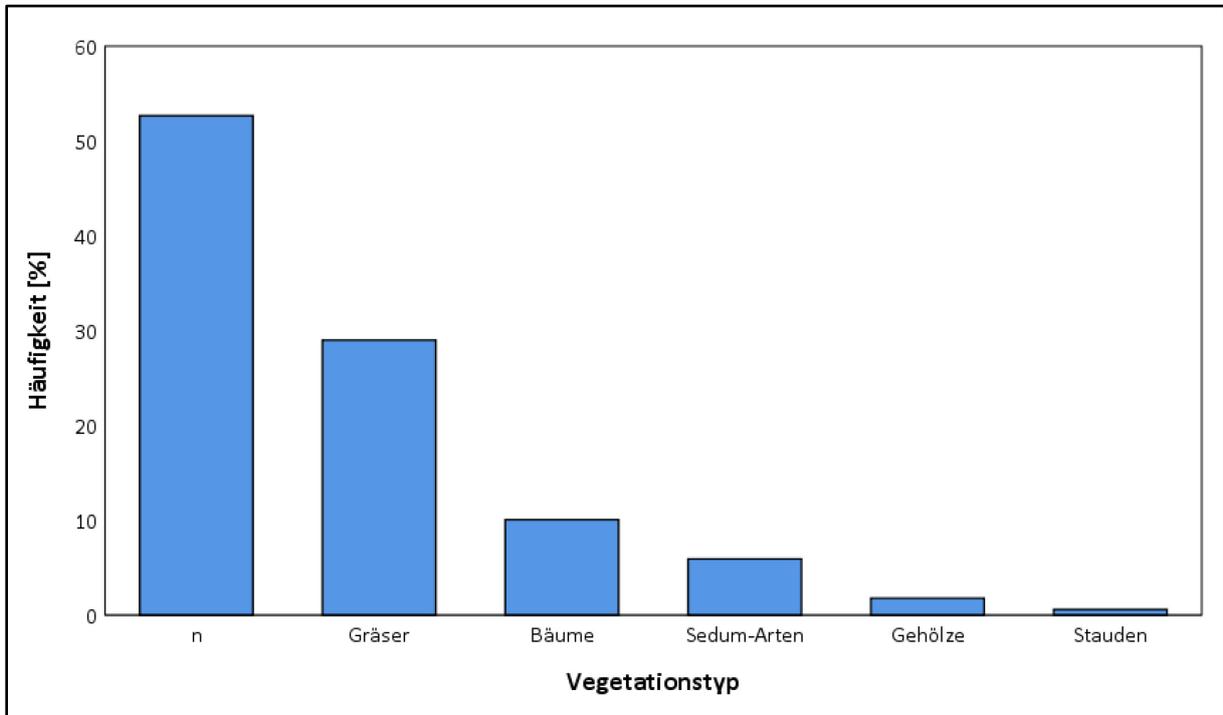


Abbildung 47: Prozentuale Anteile der in den Studien genutzten Vegetationstypen.

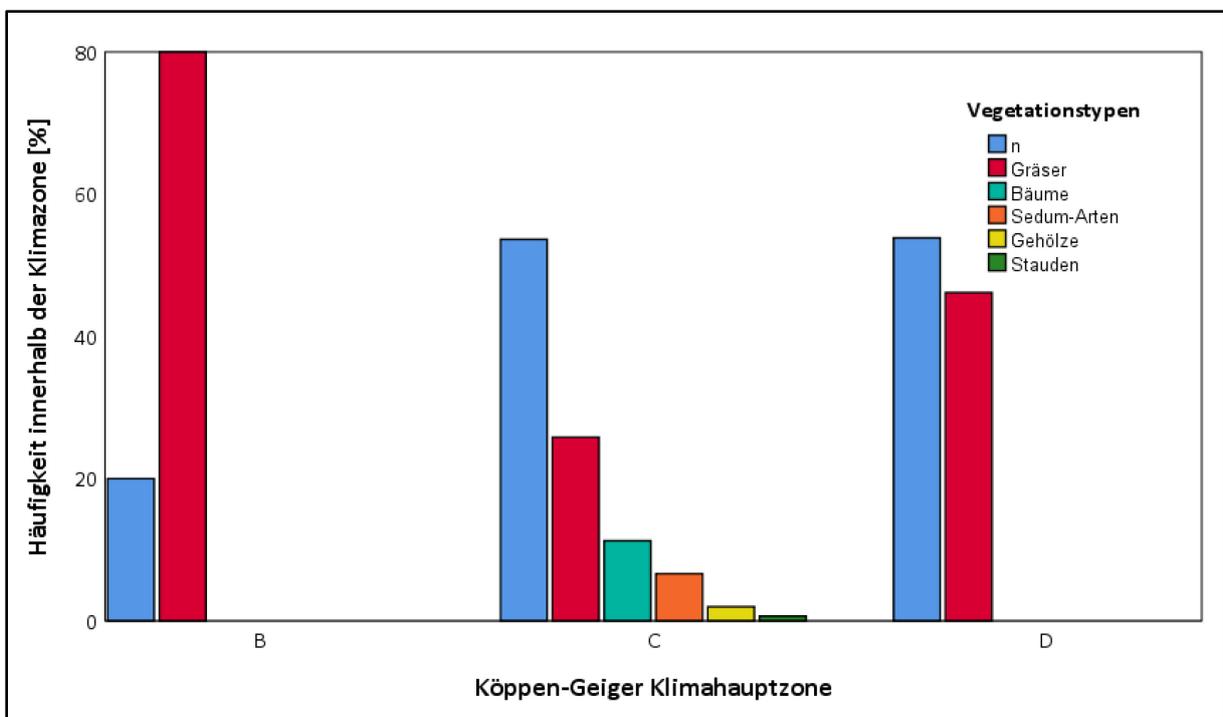


Abbildung 48: Dominierende Vegetationstypen in den Klimahauptzonen nach Köppen-Geiger.

Ein ähnliches Bild ergibt auch die Unterteilung der Studien nach den klimatischen Bedingungen der untersuchten Gebiete (Abbildung 48). Dieser Umstand erscheint auf den ersten Blick überraschend, da man Sedum als dominierenden Vegetationstyp vermuten würde. Da der Großteil der Studien jedoch durch Modellierungen mit mikro- oder mesoskaligen Klimamodellen durchgeführt wurde kann die Dominanz der Begrünung mit Gräsern anhand der Parametrisierung erklärt werden. Da für viele Modelle durch die Annahme von Gräsern auf Dachbegrünungen die Eingabewerte für Grünland übernommen oder angepasst werden konnten scheint die Annahme ein guter Kompromiss zwischen praktikabler und erfahrungsgestützter Modellierung und den realen Bedingungen zu sein. Der Studienvergleich im Rahmen der hier durchgeführten Meta-Analyse wurde erschwert durch die fehlende standardisierte Methodik zur Erfassung der mikroklimatischen Effekte, wie auch Brune et al. (2017) feststellten. Es herrschen u.a. verschiedene Längen und Zeitpunkte der Messreihen, klimatische und witterungsbedingte Unterschiede und teilweise schwer vergleichbare räumliche Skalen vor. Was den Vergleich, im Gegensatz zu den Studien zur Regenwasserbewirtschaftung mit Dachbegrünungen, zusätzlich erschwert, sind die oft unzureichend beschriebenen Charakteristiken der Dachbegrünungen bezüglich technischer Ausführungen. So wurden z.B. nur in 20% der Studien Substratstärken angegeben (s.o.).

Die außerdem aus der geringeren Anzahl von Studien resultierende relativ geringe Anzahl von Datenpunkten machte eine systematische Aufarbeitung in einem vergleichbaren Rahmen wie bei Studien zur Regenwasserbewirtschaftung unmöglich. Für die stadtklimatisch relevanten Effekte Reduzierung der durchschnittlichen Lufttemperatur und maximalen Reduzierung der Lufttemperatur (jeweils im Straßenraum bzw. in 1-2 m Höhe über dem Boden) wurden einige potenziell relevante Parameter identifiziert.

3.2.5.2 Änderung der durchschnittlichen Lufttemperatur

Die Änderung der durchschnittlichen, meist über längere Zeiträume gemessenen, Lufttemperaturen in den analysierten Studien reichte von 0 bis $-1,8$ °C. Im Mittel über alle Studien ($N = 57$) wurde die Tagesdurchschnittstemperatur um $0,62$ °C gesenkt.

Um einen Anhaltspunkt für Zusammenhänge zwischen den die Umgebungstemperatur beeinflussenden Variablen zu gewinnen, wurde eine **bivariate lineare Regression** der durchschnittlichen Temperaturänderung durch Dachbegrünungen und unterschiedlichen technisch-konstruktiven und klimatisch-ökologischen Variablen bzw. Charakteristiken durchgeführt. Die Streudiagramme der Variablen mit den jeweiligen linearen Regressionsgeraden und Bestimmtheitsmaßen (R^2) sind in Abbildung 49 dargestellt. In den Streudiagrammen sind, u.a. durch die insgesamt geringe Anzahl an Datenpunkten und

teilweise Clusterung durch einzelne Studien mit vielen Datenpunkten, eher geringe (lineare) Zusammenhänge erkennbar, das bestätigt sich auch bei Betrachtung der meist sehr geringen Bestimmtheitsmaße R^2 . Bei dieser Analyse wurden keine signifikanten linearen Zusammenhänge identifiziert. Die zu erkennenden Tendenzen bei Änderungen der technischen Charakteristiken, höhere Abkühlungsleistung mit größerem Anteil der begrünten Dächer im Untersuchungsgebiet (Abbildung 49a) und mit kleiner werdendem Untersuchungsgebiet (Abbildung 49b) erscheinen in dem Zusammenhang logisch. Eine **multiple lineare Regressionsanalyse** der Faktoren wurde in dem Zusammenhang nicht durchgeführt, da es nur eine sehr geringe Anzahl von Datenpunkten gab, bei denen ein Großteil der zu untersuchenden Faktoren gleichzeitig angegeben waren.

Technische Charakteristiken

Klimatische/ökologische Charakteristiken

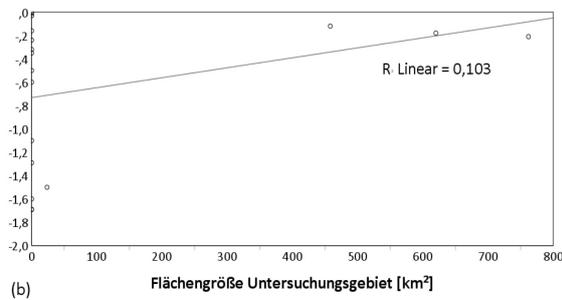
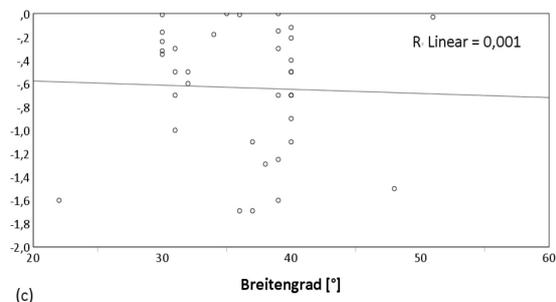
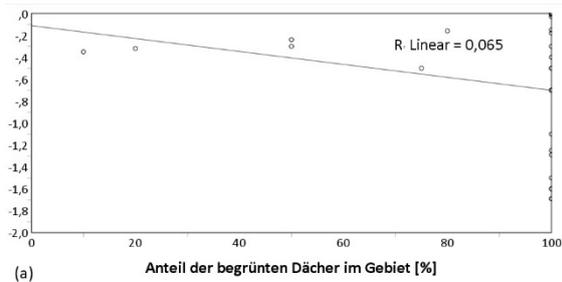


Abbildung 49: Streudiagramme der Änderung der durchschnittlichen Lufttemperatur (meist eines Tages) auf Fußgängerniveau in der Umgebung der Dachbegrünungen (bei kleinräumigen Untersuchungen) oder im Durchschnitt über einen größeren Raum (z.B. Stadtteil). Die Y-Achse stellt jeweils die durchschnittliche Temperaturänderung im Gegensatz zum nicht-Begrünungs-Szenario dar. Eingetragen sind jeweils die linearen regressionsgeraden und das Bestimmtheitsmaß R^2 .

Bei den Mittelwerten und Medianen der Änderungen der Durchschnittstemperaturen in den Klimahauptzonen C (Mittelwert: $-0,60$ °C; Median: $-0,46$ °C) und D (Mittelwert: $-0,85$ °C; Median: $-0,90$ °C) konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Eine Tendenz zu deutlicheren Abkühlungen in der Klimahauptzone D (Abbildung 50) war durch die geringe Anzahl an Datenpunkten ($N = 6$) nicht aussagekräftig.

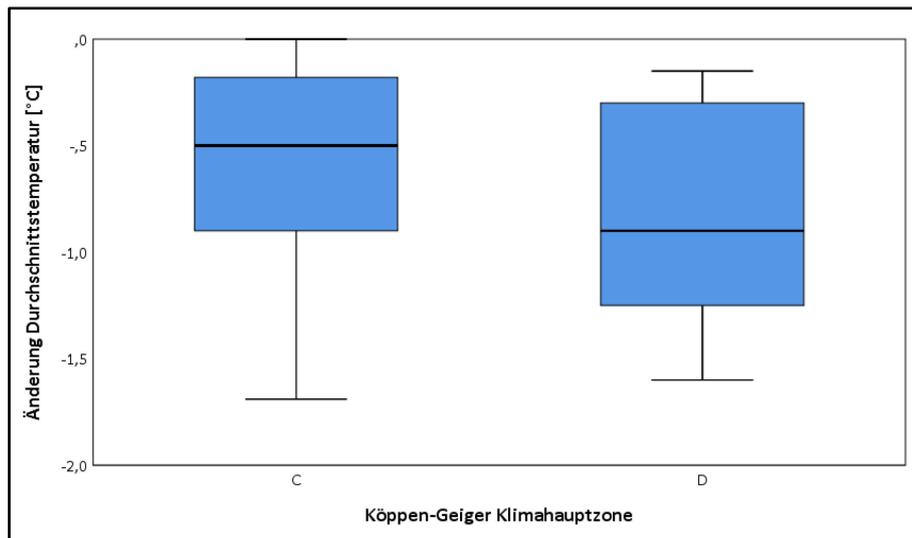


Abbildung 50: Änderung der Durchschnittstemperaturen durch Dachbegrünungen in den Köppen-Geiger Klimahauptzonen.

Die Skalen der Untersuchungsgebiete wurden in folgende Kategorien nach ungefähren Flächengrößen eingeordnet:

- Building: einzelne Gebäude wurde die Kategorie
- Canyon: Straßenschluchten bzw. Hinterhöfe mit den umgebenden Gebäuden
- Neighborhood: mehrere Gebäude bzw. Quartier
- District: Stadtteil
- City: Gesamt-Stadt
- Region: Region bzw. mehrere Städte oder Städte inkl. umgebende Regionen

Für die Absenkung der Durchschnittstemperaturen durch Dachbegrünungen konnten nur Daten aus Studien mit den Skalen Gebäude, Quartier, Stadt und Region verwendet werden. Die Mittelwerte und Mediane (Abbildung 51) der einzelnen Skalen wurden durch die entsprechenden Tests als signifikant voneinander unterschiedlich eingestuft, zumindest die Unterschiede der Skalen Gebäude (N = 7; Mittelwert: -0,84 °C; Median: -0,70 °C), city (N = 24; Mittelwert: -0,80 °C; Median: -0,75 °C) und Region (N = 6; Mittelwert: -0,63 °C; Median: -0,60 °C) gegenüber den Werten der Skala Quartier (N = 22; Mittelwert: -0,36; Median: -0,19 °C). Die höchste Absenkung der durchschnittlichen Umgebungstemperaturen durch Dachbegrünungen wurden demnach auf der räumlichen Ebene von einzelnen Gebäuden geleistet.

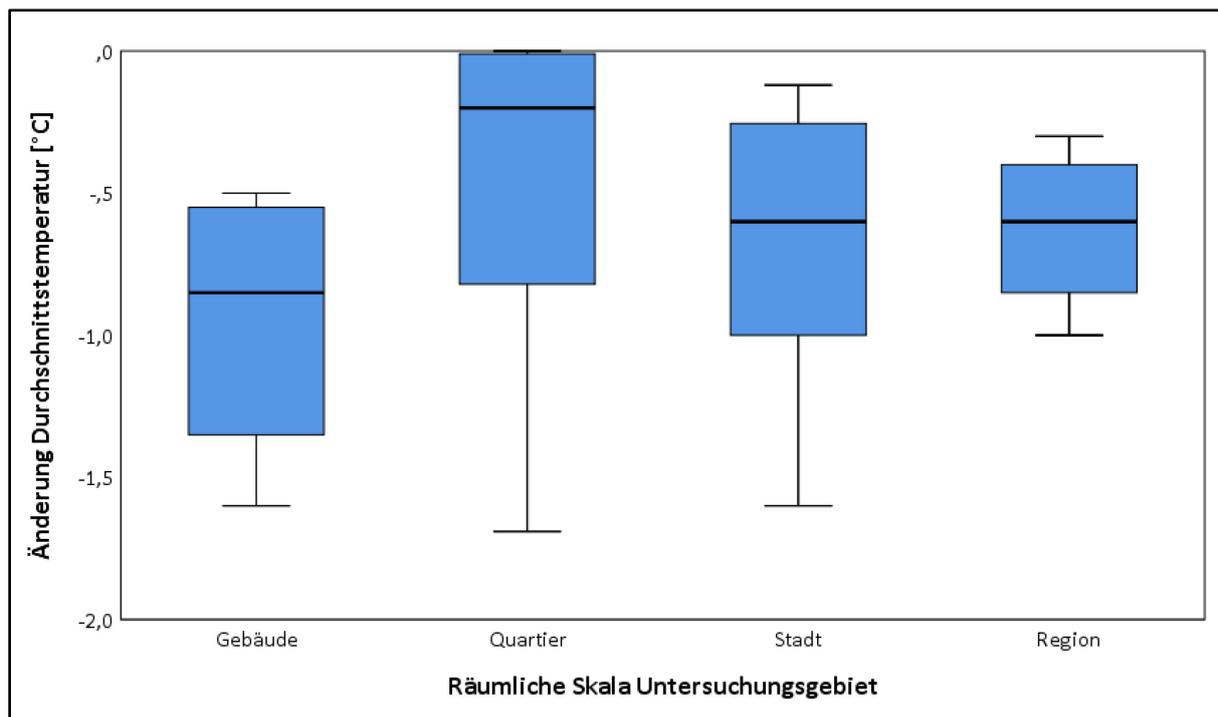


Abbildung 51: Box-and-Whisker-plot der Änderungen der Durchschnittstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zur Größe bzw. Skala des Untersuchungsgebietes.

Die in die Datenbank übernommenen Bebauungstypologien sind die in den jeweiligen Studien angegebenen Kategorien, es wurde also keine selbstgewählte Einteilung vorgenommen. Bei der Betrachtung der Bebauungstypologien zeigte sich ein auf den ersten Blick deutliches Bild (Abbildung 52). Das mit Abstand größte Potenzial zur Senkung der Durchschnittstemperatur in der Umgebung von Dachbegrünungen schien demnach in Wohngebieten vorhanden zu sein (N = 4; Mittelwert: -1,17 °C; Median: -1,49 °C). Die Typologien Industrie (N = 17; Mittelwert: -0,25 °C; Median: -0,21 °C), Hochhäuser (N = 1; Mittelwert: 0°C; Median: 0°C) und mittelhohe Gebäude (N = 1; Mittelwert: -0,01 °C; Median: -0,01 °C) schienen deutlich geringeres Abkühlungspotenzial durch Dachbegrünungen zu haben. Durch die geringe Anzahl an Daten insbesondere in den beiden letztgenannten Typologien werden die Aussagen jedoch abgeschwächt, auch die Tests nach Unterschieden in den Mittelwerten und Medianen lieferten keine signifikanten Ergebnisse.

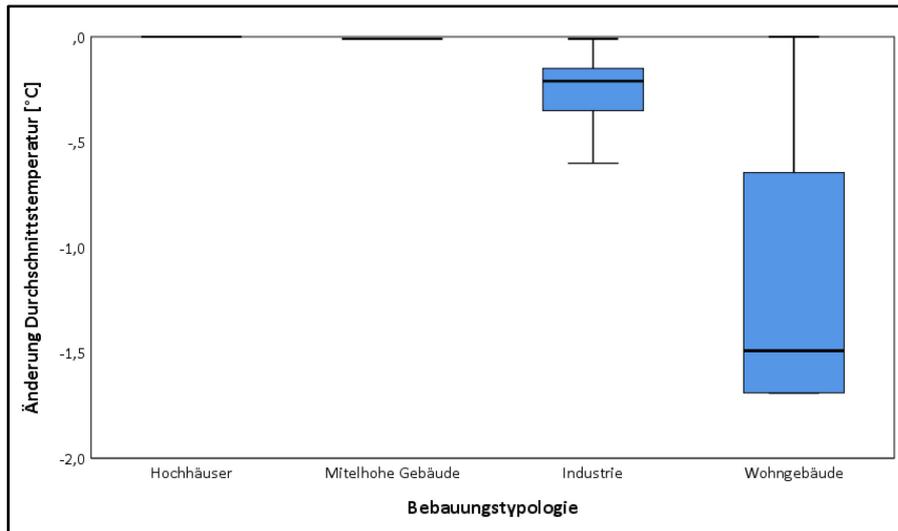


Abbildung 52: Box-and-Whisker-plot der Änderungen der Durchschnittstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zur jeweiligen Bebauungstypologie des Untersuchungsgebietes.

Insgesamt vier unterschiedliche Typen von Dachbegrünungen wurden in den untersuchten Studien betrachtet (nur extensiv und intensiv bei Durchschnittstemperaturen). Bei etwa der Hälfte der Studien (29 von 57), welche durchschnittliche Änderungen von Umgebungstemperaturen analysierten, wurde kein Typ angegeben. Weder die Tests auf Unterschiede in den Mittelwerten noch die auf Unterschiede in den Medianen lieferten signifikante Ergebnisse. Extensivdächer (N = 22) hatten etwas geringere Abkühlungswerte (Mittelwert: -0,89 °C; Median: -0,85 °C) als Intensivdächer (N = 6; Mittelwert: -0,97 °C; Median: -0,85 °C), siehe auch Abbildung 53.

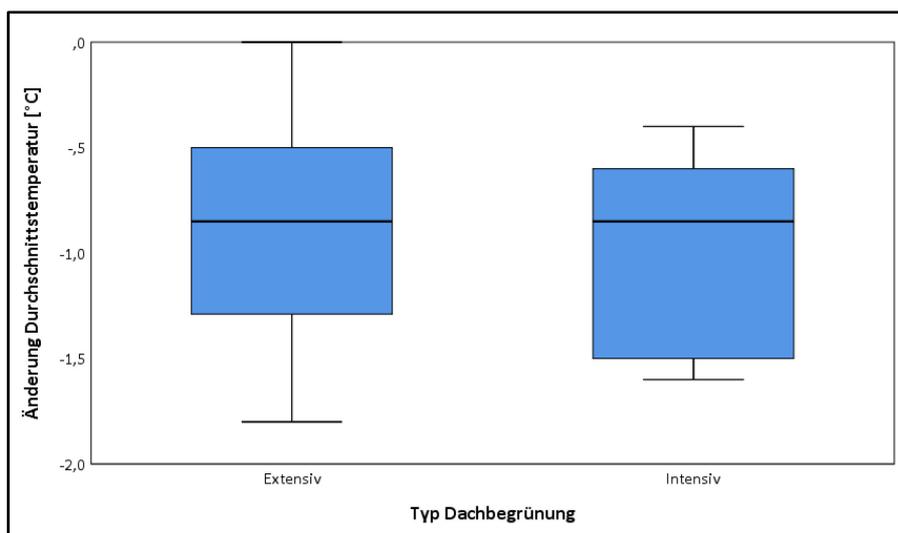


Abbildung 53: Box-and-Whisker-plot der Änderungen der Durchschnittstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zum Dachbegrünungstyp.

3.2.5.3 Änderung der maximalen Lufttemperatur

Die maximale Änderung der Umgebungstemperatur (Temperatur in 1-2 m Höhe über dem Boden, z.B. in Straßenschluchten) von Dachbegrünungen wurde in den meisten Studien als maximale Änderung während eines oder mehrerer Tage (inkl. Nächte) angegeben (N = 138). Die Spannweite reichte hier von keiner Änderung bis zu maximal 3,8 °C bei einem Mittelwert von -0,73 °C.

Technische Charakteristiken

Klimatische/ökologische Charakteristiken

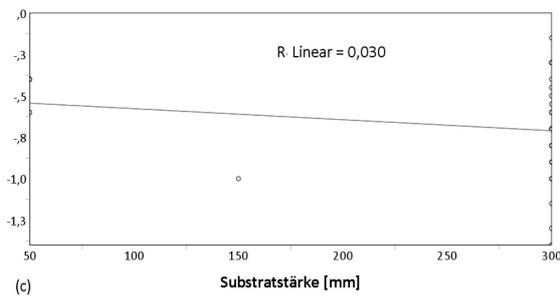
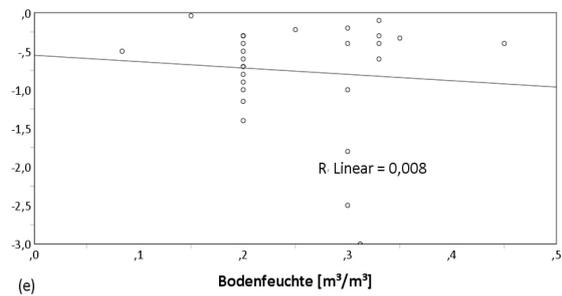
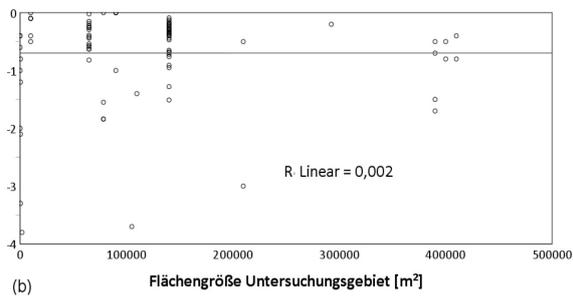
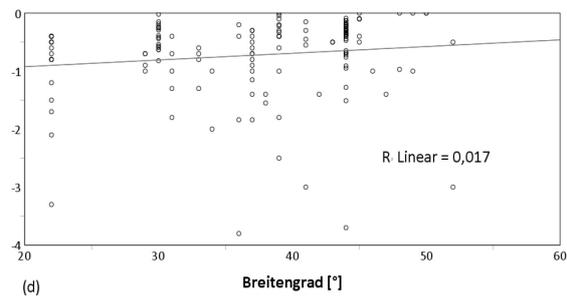
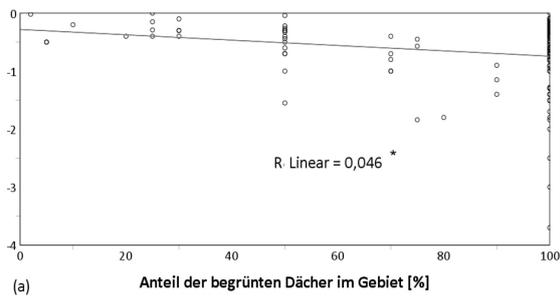


Abbildung 54: Streudiagramme der maximalen Änderung der Lufttemperatur auf Fußgängerniveau in der Umgebung der Dachbegrünungen (bei kleinräumigen Untersuchungen) oder über einen größeren Raum (z.B. Stadtteil). Die Y-Achse stellt jeweils maximale Temperaturänderung im Gegensatz zum nicht-Begrünungs-Szenario dar. Eingetragen sind jeweils die linearen regressionsgeraden und das Bestimmtheitsmaß R^2 . Signifikante bivariate lineare Zusammenhänge sind mit * gekennzeichnet.

Die **bivariate lineare Regression** der die Umgebungstemperatur beeinflussenden Variablen mit den maximalen Temperaturänderungen lieferte im Falle des Anteils begrünter Dachflächen in den Untersuchungsgebieten einen signifikanten Zusammenhang mit der maximalen Temperaturänderung (Abbildung 54a). Hier scheint ein positiver Zusammenhang zu bestehen, d.h. je mehr Dächer im jeweiligen Untersuchungsgebiet begrünt waren, desto größer wäre die maximal zu erreichende Temperaturänderung. Weitere Streudiagramme der Variablen mit den jeweiligen linearen Regressionsgeraden und Bestimmtheitsmaßen (R^2) sind in Abbildung 54 dargestellt. Die fehlende Signifikanz der weiteren Variablen Flächengröße des Untersuchungsgebiets, Substratstärke, Breitengrad und Bodenfeuchte und die sehr geringen Bestimmtheitsmaße R^2 deuten auf, mit den vorliegenden Daten, statistisch unzureichend zu beschreibende Zusammenhänge hin. Das liegt auch an der, wie im vorherigen Abschnitt zur Änderung der durchschnittlichen Temperaturen schon bemerkten, insgesamt geringen Anzahl an Datenpunkten für einzelne Variablen und der teilweisen Clusterung durch einzelne Studien mit vielen Datenpunkten.

Die trotz schwacher Ausprägung zu erkennenden Tendenzen, höhere maximale Abkühlungsleistung mit größerer Substratauflage (Abbildung 54c), geringerer geographischer Breite (Abbildung 54d) und höherer Bodenfeuchte (Abbildung 54e) erscheinen in dem Zusammenhang logisch und bestätigen die Annahmen einiger Studien bezüglich besserer Kühlleistung mit größerem Wasserdargebot.

Eine **multiple lineare Regressionsanalyse** der Faktoren wurde in dem Zusammenhang nicht durchgeführt, da es wie bei der Untersuchung der durchschnittlichen Temperaturänderung nur eine sehr geringe Anzahl von Datenpunkten gab, bei denen ein Großteil der zu untersuchenden Faktoren gleichzeitig angegeben waren.

Bei den Mittelwerten und Medianen der maximalen Temperaturänderungen in den Klimahauptzonen B (N = 4; Mittelwert: -0,85 °C; Median: -0,75 °C), C (N = 122; Mittelwert: -0,70 °C; Median: -0,50 °C) und D (N = 12; Mittelwert: -0,95 °C; Median: -0,50 °C) konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die größte Spannbreite der Ergebnisse war in Klimazone C erkennbar (0 bis -3,8 °C, Abbildung 55), was wohl auch auf die deutlich höhere Anzahl an Datenpunkten im Vergleich zu den Zonen B und D zurückzuführen ist.

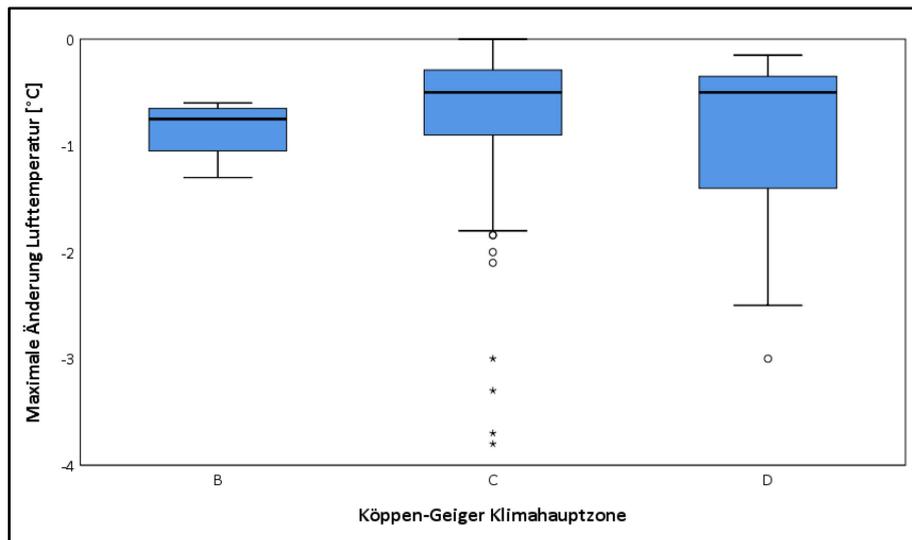


Abbildung 55: Box-and-Whisker-plot der maximalen Änderungen der Umgebungstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zur Klimahauptzone nach Köppen & Geiger.

Die räumlichen Skalen der Untersuchungsgebiete der Studien, welche maximale Temperaturänderungen berichteten, waren building, canyon, neighborhood, city und region (Abbildung 56). Die Mittelwerte der einzelnen Skalen wurden durch die entsprechenden Tests als signifikant voneinander unterschiedlich eingestuft, die Mediane nur zwischen den Skalen building und neighborhood. Folgende Werte nahmen die einzelnen Skalen an:

- Building: N = 9; Mittelwert: -1,31 °C; Median: -1,00 °C
- Canyon: N = 2; Mittelwert: -0,70 °C; Median: -0,70 °C
- Neighborhood: N = 85; Mittelwert: -0,61 °C; Median: -0,41 °C
- City: N = 35; Mittelwert: -0,76 °C; Median: -0,60 °C
- Region: N = 5; Mittelwert: -0,85 °C; Median: -0,85 °C

Auch die höchste maximale Absenkung der Umgebungstemperaturen durch Dachbegrünungen wurde demnach auf der räumlichen Ebene von einzelnen Gebäuden geleistet, bei größer werdenden Skalen waren die in den Studien modellierten bzw. gemessen maximalen Absenkungen geringer (Abbildung 56).

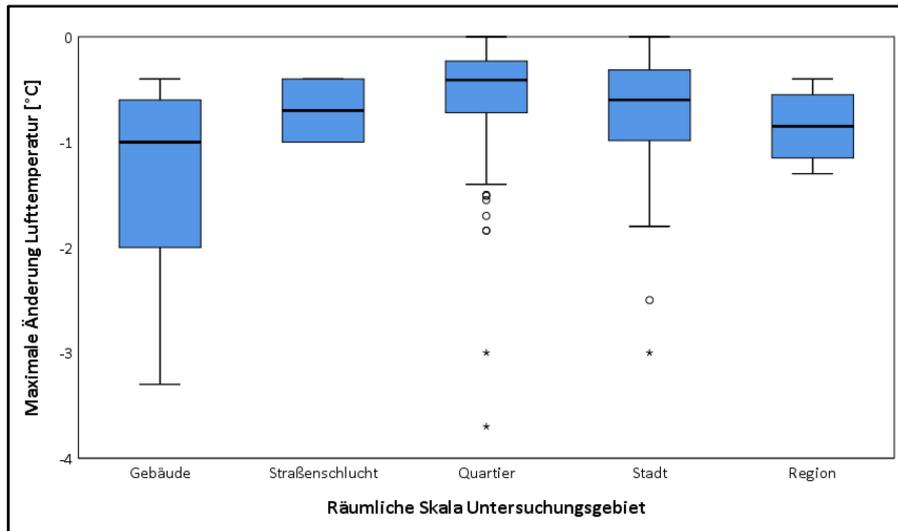


Abbildung 56: Box-and-Whisker-plot der maximalen Änderungen der Umgebungstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zur räumlichen Skala des Untersuchungsgebiets der Studien.

Die Unterschiede in den Gruppen der Bebauungstypologien sind in Abbildung 57 dargestellt. In den folgenden Betrachtungen und in Abbildung 57 sind nur die Typologien analysiert wurden, welche mindestens zwei Datenpunkte aus den Studien lieferten.

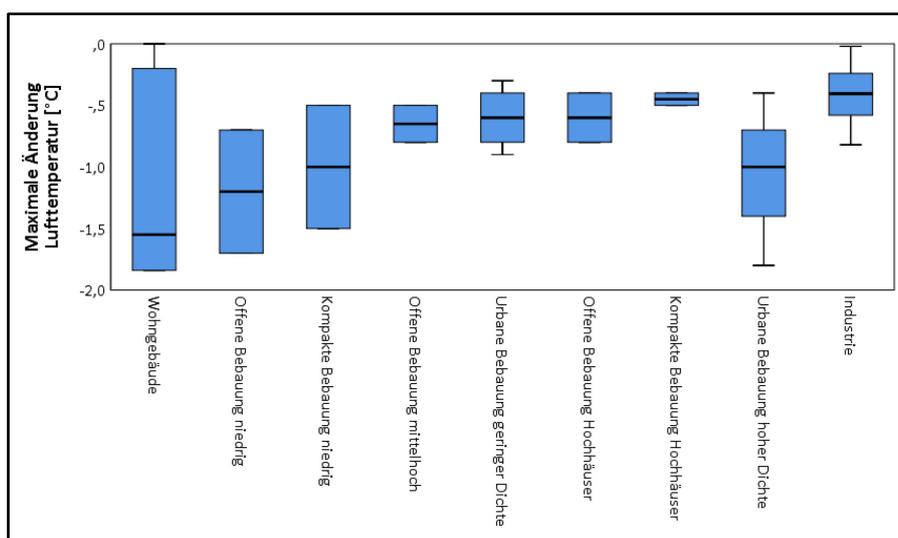


Abbildung 57: Box-and-Whisker-plot der maximalen Änderungen der Umgebungstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zur Bebauungstypologie.

Das Potenzial zur maximalen Abkühlungsleistung scheint auch in dem Fall am größten zu sein je lockerer die Bebauungsstruktur und geringer die Gebäudehöhe ist. Die Typologien Wohnbebauung, offene Bebauung mit geringer Höhe und kompakte Bebauung mit geringer Höhe hatten die höchsten Mittelwerte und Mediane bezüglich der maximalen Temperaturänderungen (Abbildung 57 und Tabelle 12).

Als Ausnahme sticht die Kategorie hochverdichtete urbane Bebauung heraus, in der sich ebenfalls maximale Abkühlungen um 1 °C zeigte.

Tabelle 12: Maximale Lufttemperaturänderungen durch Dachbegrünungen für verschiedene Bebauungstypologien.

Bebauungstypologie	N	Mittelwert [°C]	Median [°C]
Wohngebäude	5	-1,09	-1,55
Offene Bebauung niedrig	2	-1,20	-1,20
Kompakte Bebauung niedrig	2	-1,00	-1,00
Offene Bebauung mittelhoch	2	-0,65	-0,65
Urbane Bebauung geringer Dichte	4	-0,60	-0,60
Offene Bebauung Hochhäuser	2	-0,60	-0,60
Kompakte Bebauung Hochhäuser	2	-0,45	-0,45
Urbane Bebauung hoher Dichte	5	-1,06	-1,00
Industrie	16	-0,40	-0,41

Durch die geringe Anzahl an Daten in mehreren Typologien werden die Aussagen jedoch abgeschwächt, auch die Tests nach Unterschieden in den Mittelwerten und Medianen lieferten keine signifikanten Ergebnisse.

Die Mittelwerte und Mediane der maximalen Abkühlungswerte für unterschiedlichen Typen von Dachbegrünungen (extensiv, intensiv, blue-green roof, hydroponische Systeme) wurden signifikant unterschiedlich getestet. Wie in Abbildung 58 ersichtlich wird, haben hydroponische Systeme die größten Abkühlungswerte (N = 2; Mittelwert: -1,50 °C; Median: -1,50 °C), Intensivdächer (N = 33; Mittelwert: -0,91 °C; Median: -0,76 °C), Blau-Grüne Dächer (N = 2; Mittelwert: -0,50 °C, Median: -0,50 °C) und Extensivdächer (N = 71; Mittelwert: -0,56; Median: -0,40) liegen all im Schnitt bei unter 1 °C maximaler Abkühlung. Die Quantifizierungen für hydroponische Systeme und blau-grüne Dächer basieren jedoch nur auf jeweils zwei Datenpunkten und jeweils nur einer Studie (Harazono et al. 1991; Winkler 2017). Die signifikanten Unterschiede zwischen Extensiv- und Intensivdächern (\emptyset -0,56 °C bzw. -0,91 °C) sind auch aufgrund des Praxisbezugs als relevanter einzustufen.

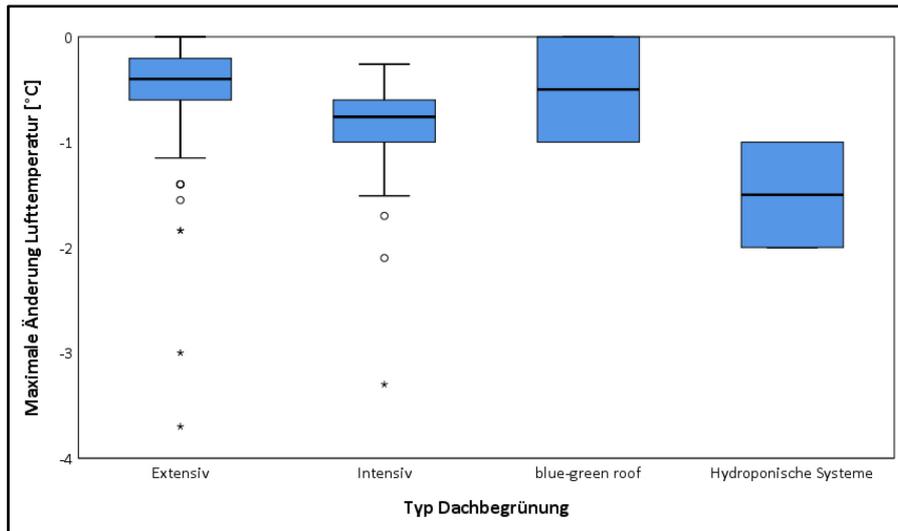


Abbildung 58: Box-and-Whisker-plot der maximalen Änderungen der Umgebungstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zum Dachbegrünungstyp.

Als weiterer die Lufttemperatur-Änderung beeinflussender Faktor konnte bei dieser Analyse auch der Pflanzentyp herangezogen werden, da dieser bei einigen Studien, die maximale Temperaturänderungen berichteten, explizit angegeben war. Wie in Abbildung 59 ersichtlich bestehen Unterschiede bezüglich der Spannweiten und Mediane. Für Stauden war nur ein Wert verfügbar, daher die Kennzeichnung als einzelne Linie im Plot. Die Werte für die Pflanzentypen waren folgende:

Sedum-Arten: N = 10; Mittelwert -0,34 °C; Median -0,32 °C

Gräser: N = 49; Mittelwert -0,63 °C; Median 0,50 °C

Kräuter: N = 1; Mittelwert & Median -0,60 °C

Sträucher: N = 3; Mittelwert -1,13 °C; Median -1,00 °C

Bäume: N = 17; Mittelwert -0,64 °C; Median -0,57 °C

Es bestehen Unterschiede in Mittelwerten und Medianen, welche nach den Tests als nicht signifikant eingestuft wurden. Geringere Abkühlungswerte wurden durch Sedumbepflanzung erreicht, die im Mittel Höchsten durch Bepflanzung mit Sträuchern. Das könnte auf eine höhere Abkühlungsleistung durch erhöhtes Verdunstungspotenzial hindeuten.

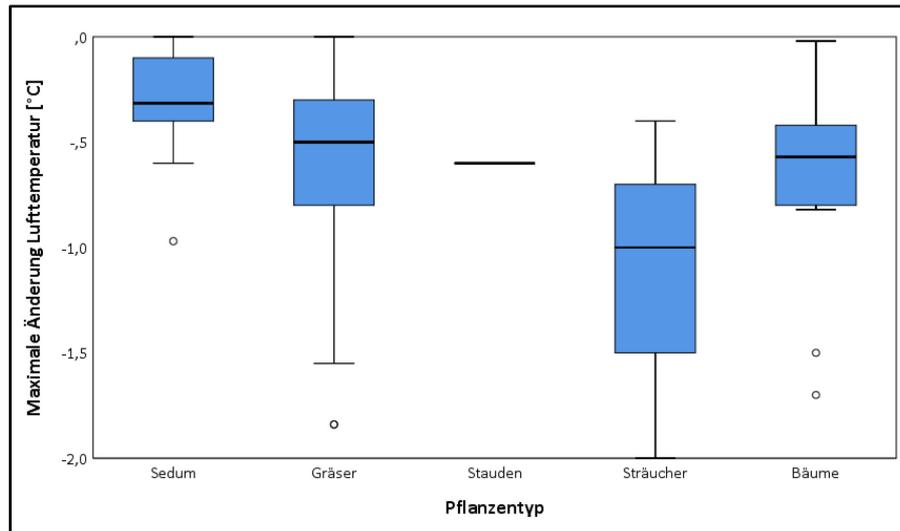


Abbildung 59; Box-and-Whisker-plot der maximalen Änderungen der Umgebungstemperaturen durch Dachbegrünungen in Bezug zu Pflanzentypen der Begrünungen.

3.3 Auswertung der Niederschlags-Abflussmessungen an Gründächern in Hamburg

Die klimatisch-hydrologischen Messungen der Dachbegrünungen werden in diesem Kapitel ausgewertet und es wird eine diagnostische Gleichung bzw. ein auf empirischen Daten des HCU-Gründachs basiertes Vorhersagemodell erstellt. Dieses soll in Abhängigkeit von einigen wenigen vorzugebenden Daten die Retentionsleistung der Dachbegrünung am HCU-Dach für bestimmte Regenereignisse möglichst genau berechnen und prognostizieren können.

3.3.1 Beschreibung und Analyse der hydrologischen und klimatischen Daten im Untersuchungszeitraum

3.3.1.1 Langfristige Entwicklungen hydrologischer Kennwerte und generelle Klimatische Verhältnisse in den Jahren 2015 – 2020 am HCU Gründach

Eine Tabelle der klimatischen Monats-Mittelwerte bzw. -summen von Niederschlag, Abfluss, Temperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung, gemessen am HCU-Dach und an der Luftmessnetz-Station Markmannstraße, ist in Tabellenanhang 1 enthalten. Zu beachten ist, dass vom 05.-30. April 2018 und vom gesamten Mai 2018 keine Daten vom HCU-Dach verfügbar sind. Für die Jahre 2015-2020 sind in Tabelle 13 die Mittelwerte bzw. Summen der hydrologischen und klimatischen Kennwerte über dem gesamten betrachteten Messzeitraum (März 2015 – Juli 2020)

aufgeführt. In Tabelle 15 sind die Monats-Mittelwerte über dem gesamten betrachteten Messzeitraum aufgeführt. Im gesamten Untersuchungszeitraum wurden 3871 mm Regen gemessen, 57,5 % davon wurden insgesamt auf dem Gründach zurückgehalten. Die Regen- und Abflussmengen variieren naturgemäß über die verschiedenen Jahre und Zeiträume. Die gemessenen Regenmengen für ganze Jahre waren im Bereich von 618 mm (2019) bis 991 mm (2017), die Spannweiten der Retentionsleistungen für ganze Jahre liegt im Bereich zwischen 52 % (2017) bis 71 % (2019), was darauf hindeutet, dass mit höheren Jahresniederschlägen weniger Retentionsleistung zu erwarten ist. Diese Aussage trifft jedoch nicht bei Betrachtung kürzerer Zeiträume zu (Tabelle 13 und Abbildung 60). Am Beispiel der durchschnittlichen Monatswerte für Niederschlag und Retention zeigt sich nicht, dass die Monate mit den größten Regenmengen auch die geringsten Retentionswerte innehaben. Die höchsten durchschnittlichen monatlichen Werte des Regenwasserrückhalts (63-76 %) auf der Dachbegrünung haben die Monate Mai bis September, in denen auch die höchsten monatlichen Mitteltemperaturen herrschen. Dieses Verhalten entspricht den aus den Studien erwarteten Anstieg der Retentionsleitungen mit höheren Durchschnittstemperaturen durch erhöhte Evapotranspirationsleistungen (Kapitel 3.2.1).

Tabelle 13: Hydrologische und klimatische Kennwerte für einzelne Jahre im Messzeitraum 2015-2020. in den Jahren 2015, 2018 und 2020 fehlen jeweils Daten für mehrere Monate (Anzahl * entspricht der Anzahl der fehlenden vollen Monate), daher sind die hier aufgeführten Daten in den Fällen nicht auf das Gesamt-Jahr bezogen. Daten zu Temperatur und Globalstrahlung stammen von der Luftmessnetzstation Markmannstraße.

Jahr	mittlere Regenmenge pro Ereignis [mm]	Anzahl Niederschlags-Ereignisse	Regenmenge [mm]	Dach-Abfluss [mm]	Retention [%]	Jahres-Mitteltemperatur [°C]	Jahres-summe Globalstrahlung [kWh/m ²]
2015**	4,8	167	702,9	277,7	60,5	12,2	911
2016	3,3	212	682,6	305,7	55,2	10,6	977
2017	5,0	201	991,0	480,8	51,5	10,5	942
2018**	3,8	118	448,4	256,3	42,8	10,7	903
2019	3,5	173	617,8	176,9	71,4	11,3	1001
2020*****	3,7	105	428,7	146,8	65,8	11,0	758

Tabelle 14: Hydrologische und klimatische Kennwerte im Messzeitraum 2015-2020, gemittelt über Monate. Daten zu Temperatur und Globalstrahlung stammen von der Luftmessnetzstation Markmannstraße.

Monat	mittlere Regenmenge pro Ereignis [mm]	mittlere monatliche Anzahl Niederschlags-Ereignisse	mittlere monatliche Regenmenge [mm]	mittlerer monatlicher Dach-Abfluss [mm]	mittlere monatliche Retention [%]	Monats-Mitteltemperatur [°C]	mittlere Monatssumme Globalstrahlung [kWh/m ²]
1	4,2	17	68,3	36,5	46,3	2,9	17
2	3,9	15	64,5	32,7	53,9	3,7	35
3	5,4	13	55,2	26,5	53,2	5,8	63
4	2,6	10	27,2	9,9	55,3	9,7	125
5	3,3	14	44,2	13,4	74,8	13,3	149
6	4,8	14	72,9	29,4	62,6	18,1	161
7	5,6	17	81,1	26,9	67,0	18,8	149
8	3,4	17	57,6	15,6	76,0	19,4	130
9	3,8	15	58,6	20,0	68,4	15,7	89
10	4,1	16	66,8	28,4	58,7	11,0	48
11	3,3	18	68,2	35,6	48,6	6,4	21
12	3,3	19	62,6	35,6	45,1	5,7	13

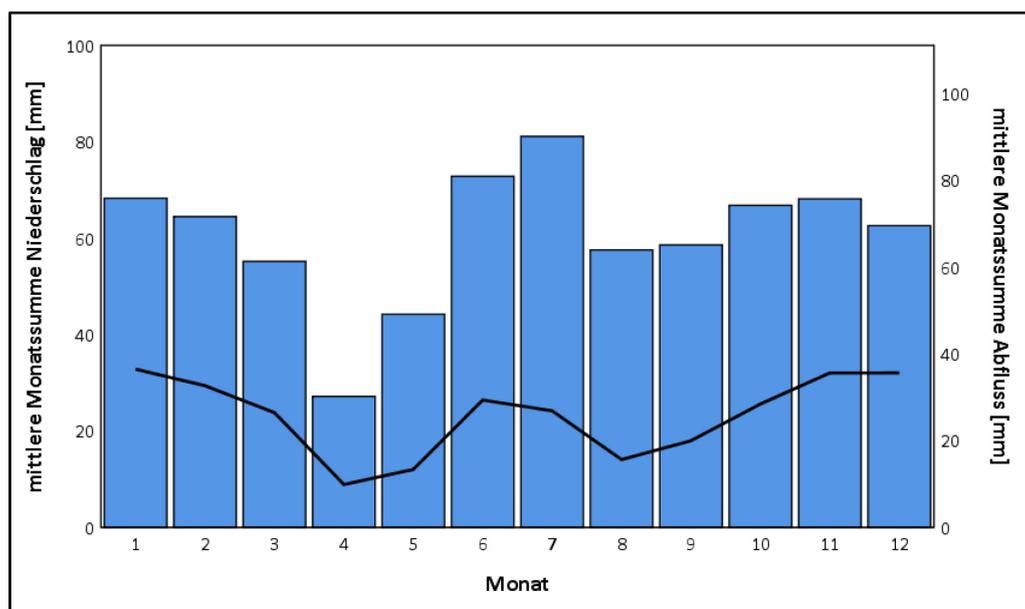


Abbildung 60: mittlere Monatssummen des Niederschlags (blaue Balken) und Abfluss (schwarze Linie) von 2015-2020, gemessen am Gründach des HCU-Gebäudes.

Über den gemessenen Zeitraum scheint sich die Retention im Monatsmittel zu erhöhen, es konnte mittels Regressionsanalyse ein signifikanter positiver linearer Zusammenhang zwischen fortschreitender Zeit und den Monatswerten der Retention nachgewiesen werden und ist auch in Abbildung 61 (oben) erkennbar.

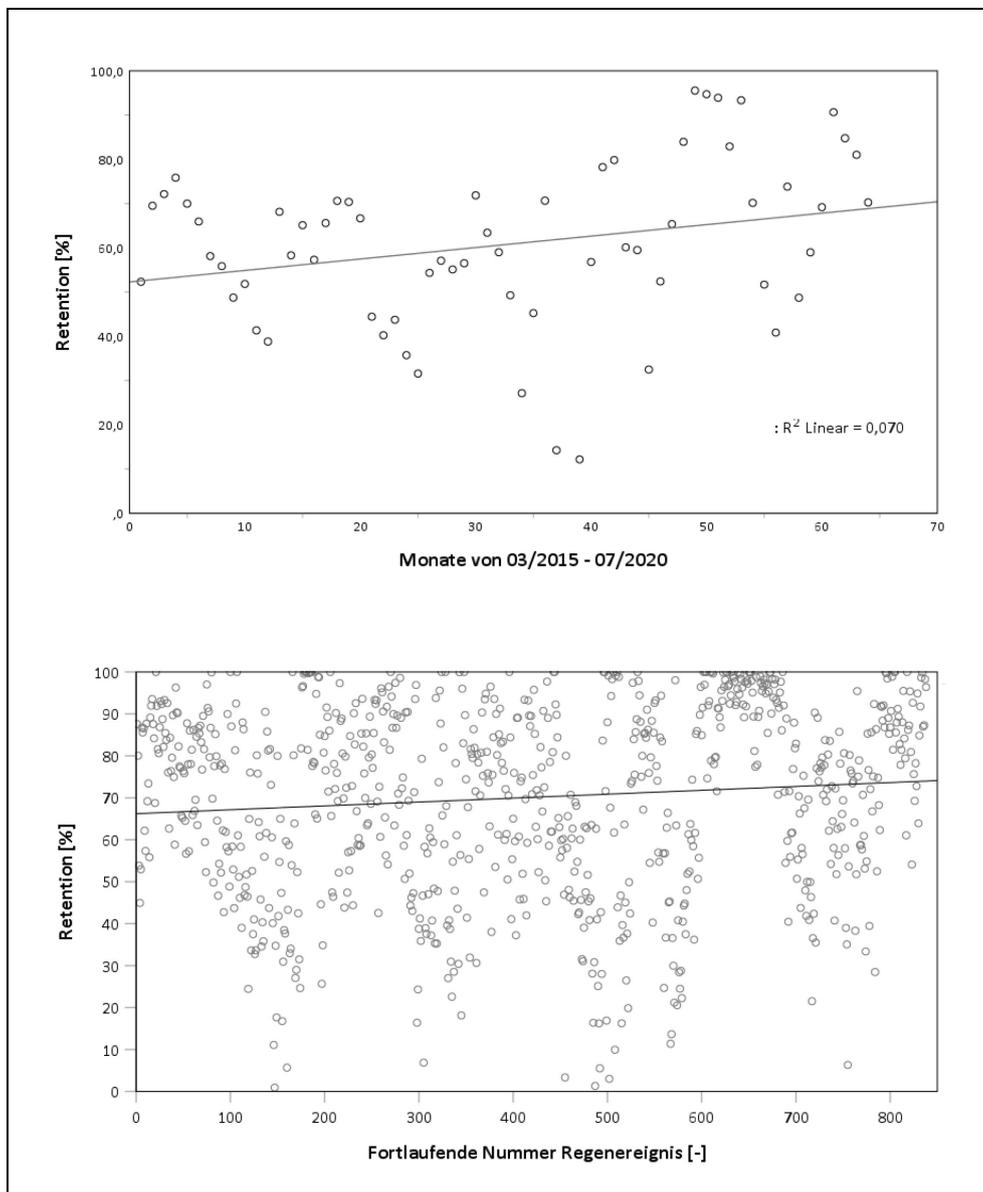


Abbildung 61: Streudiagramme der Werte der monatlichen Retention von Regenwasser (oben) auf dem HCU-Dach und der Retention einzelner Regenereignisse mit den fortlaufenden Nummern der Regen (unten). Die zugehörigen Trendlinien sind ebenfalls eingetragen.

Mit einem signifikanten ($p = 0,036$) positiven Regressionskoeffizient von 0,259 könnte ein monatlicher Anstieg der Retention um 0,26% geschätzt werden. Neben den monatlichen Werten für den Regenwasserrückhalt auf der Dachbegrünung des HCU Gebäude zeigte sich dieser Effekt auch bei der Betrachtung der Retentionswerte für einzelne Regenereignisse (Abbildung 61 unten). Eine Regressionsanalyse der fortlaufenden Nummern der Regenereignisse (Nr. 1 = Regen vom 27.05.2015...Nr. 838 =

Regen vom 28.07.2020) und der Retention [%] ergab ebenfalls eine signifikante positive lineare Beziehung ($p = 0,004$) mit einem Regressionskoeffizienten von 0,009. Wie in Kapitel 3.2.1 erläutert können sich mit zunehmendem Alter von Dachbegrünungen u.U. das Porenvolumen und -Größen der Substrate durch die Ansammlung und Setzung von organischem Material (Getter et al. 2007) und Wurzelentwicklung (Speak et al. 2013a) verändern und somit die Wasserkapazität erhöhen (Getter et al. 2007). Auch wenn die Studien diesbezüglich keine eindeutige Richtung der Veränderung feststellte scheint sich das zunehmende Alter des HCU-Dachs positiv auf den Wasserrückhalt auszuwirken. Der zunehmende Pflanzenbedeckungsgrad der Dachbegrünung (Abbildung 10) kann in den ersten beiden Jahren zusätzliche Wirkung auf den Regenwasserrückhalt gehabt haben. Seit dem Frühjahr 2017 zeichneten sich diesbezüglich keine bedeutenden Veränderungen mehr, ab dem Zeitpunkt wurde konstant eine nahezu vollständige Vegetationsbedeckung erreicht (> 90 %).

3.3.1.2 Auswertung von einzelnen Niederschlagsereignissen am HCU Gründach

Für die Betrachtung der Einzel-Regenereignisse wurden die Daten erneut bereinigt. Regenereignisse wurden in den gemessenen Datensätzen als voneinander getrennt definiert, wenn zwischen ihnen eine mindestens 6 Stunden lange Trockenphase ohne gemessenen Niederschlag lag („inter-event-time“, Kapitel 2.4.4). Niederschlagsereignisse, die eine Retention < 0% lieferten, wurden aus dem Datenkollektiv entfernt. Eine Retention von weniger als 0 % bedeutet, dass mehr Wasser aus dem Gründach abgefließen als Regen gefallen ist. Das kann passieren, wenn bei Beginn eines neuen Regens immer noch Regenwasser aus dem vorherigen Regen aus dem Dach abfließt. Außerdem kann es vorkommen, dass noch kleine Regenmengen im „System“ haften, also z.B. noch kleine Reste Wasser in Kippzählern stehen oder auch in Rohrleitungen an Oberflächen haften. Außerdem kann bei Schneeschmelz-Ereignissen Wasser abfließen, welches vorher nicht mit dem Regenmesser aufgenommen wurde, da diese nur sehr ungenau bei Schnee messen. Weiterhin wurden Regenereignisse, deren Gesamt-Regenmenge 0,1 mm betrug, vom Datenkollektiv entfernt. Diese liegen ungefähr in der minimalen Messgenauigkeit der Geräte und sind somit als unzuverlässig einzustufen, da sie nicht genau einem Regenereignis zugeordnet werden können. Von den 976 Regenereignissen blieben nach dieser Bereinigung noch 838 übrig. Die Anzahl der einzelnen Regen für die Jahre sind 143 (2015), 171 (2016), 180 (2017), 87 (2018), 157 (2019) und 100 (2020). Der Großteil aller einzelnen Regen waren mittlere und kleine Ereignisse (Regenmenge: Mittelwert 4,5 mm/Median 2,2 mm). Den Regenwasserrückhalt bestimmende Mittelwerte sind in Tabelle 15 aufgeführt. Der mittlere volumetrische Regenwasserrückhalt (Retention) für Einzelregen ist 70,1 % (Median 75,0 %). Die Werte sind deutlich höher als der Gesamtrückhalt 2015-2020 (57,5 %), da in der Betrachtung aller einzelner Regen die vielen kleineren Ereignisse eine höhere

Gewichtung bekommen und tendenziell höhere Retentionswerte annehmen. Die Dominanz der kleinen Regen unter 2mm wird in Abbildung 62 deutlich.

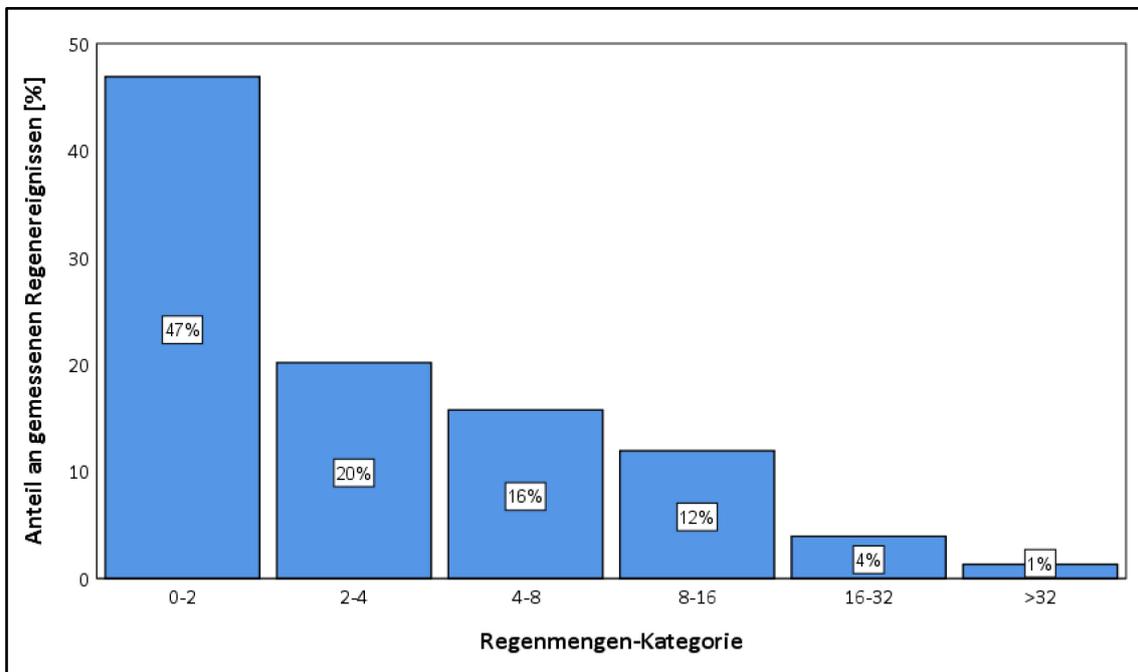


Abbildung 62: Anteil der gemessenen Datensätze bzw. Regenereignisse pro Regenmengenkategorie von 2015 – 2020 in % der Gesamtregenereignisse (838 = 100%).

Jahreszeitliche Unterschiede können bezüglich der Mittelwerte der hydrologischen Faktoren bzw. der den Wasserrückhalt bestimmenden Faktoren anhand Tabelle 15 beschrieben werden. Im Sommer fielen demnach die Regen mit den größten Mengen und der höchsten Intensität, wodurch die Verzögerungswerte geringer sind als in den übrigen Jahreszeiten. Trotzdem ist die mittlere Retention mit 78 % und die Reduktion der Spitzenabflüsse mit 94 % als sehr hoch einzustufen.

Tabelle 15: Jahreszeitliche Unterschiede in den Mittelwerten der Charakteristiken der Regenereignisse und dem Wasserrückhalt und Mittelwerte über den gesamten Messzeitraum.

Jahreszeit	Regenmenge [mm]	Regendauer [h]	mittlere Intensität [mm/h]	Vorherige Trockenzeit (ADWP) [h]	Retention [%]	Reduktion Spitzenabfluss [%]	Abflussverzögerung [min]	Verzögerung Abflussmaximum [min]
Winter	4,7	9,4	0,6	34,6	55,5	90,0	28	196
Frühling	3,7	5,8	1,3	48,4	80,2	94,5	64	101
Sommer	5,0	5,0	2,1	44,0	78,1	93,7	28	88
Herbst	4,6	7,4	1,1	40,7	65,9	91,7	31	148
Gesamt	4,5	6,8	1,3	41,9	70,1	92,5	38	131

Im Hinblick auf den Wasserrückhalt von (konvektiven) Starkregenereignissen, die vorwiegend in Sommermonaten auftreten sind diese Ergebnisse von besonderer Bedeutung. Um eine Tendenz zur Effektivität des Regenwasserrückhalts im Sinne von volumetrischer Abflussreduktion und Reduktion des Spitzenabflusses bei unterschiedlichen Regenmengen zu erhalten, wurden die Regenmengen-Kategorien hinsichtlich dieser Faktoren analysiert (Abbildung 63). Wie nach dem systematischen Review zu erwarten war, nahm die prozentuale Regenrückhaltung mit zunehmender Menge ab (Carson et al. 2013; Carter und Rasmussen 2006; Razzaghmanesh und Beecham 2014; Simmons et al. 2008; Stovin et al. 2015; van Woert et al. 2005; Villarreal und Bengtsson 2005). Das gilt auch für die Dachbegrünung auf dem HCU-Dach für die zurückgehaltene Regenmenge und die Reduktion des Spitzenabflusses (Abbildung 63 und Tabelle 16). Die Mittelwerte (Mediane) des Regenmengen-Rückhalts und der Spitzenabfluss-Reduktion sanken dabei von 77 % (85 %) bzw. 99 % (99 %) in der Regenmengen-Kategorie 0-2 mm auf 50 % (47 %) bzw. 70 % (76 %) bei Regenereignissen mit über 32 mm. Dennoch sind diese Reduktionen auch bei größeren Regenereignissen noch als erheblich zu beurteilen.

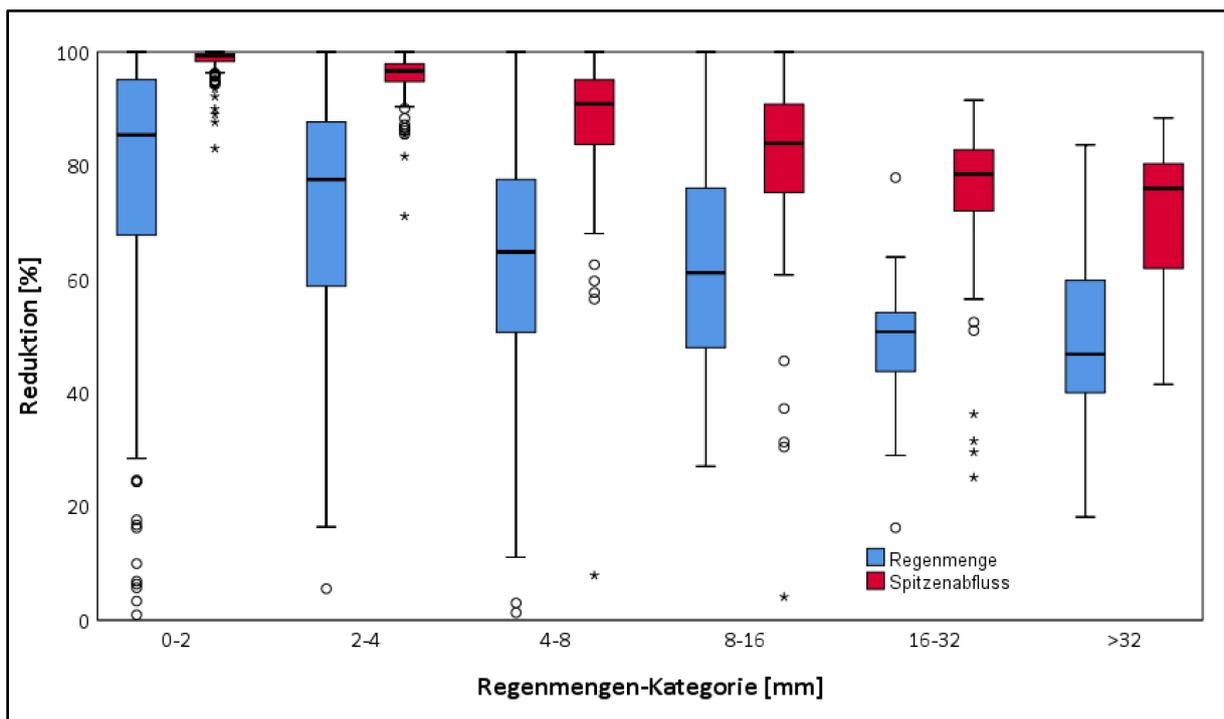


Abbildung 63: Box-and-Whisker plots der Prozentualen Reduktionswerte der Dachbegrünung auf dem HCU-Dach bezüglich der Gesamt-Regenmenge und der Spitzenabflusses, Kategorisiert nach regenmengen-Kategorien.

Tabelle 16: Mittelwerte und Mediane des Rückhalts der Regenmengen und der Spitzenabfluss-Reduktion von verschiedenen Regenmengen-Kategorien auf dem HCU-Dach.

Regenmengen-Kategorie [mm]	Rückhalt Regenmenge [%]		Reduktion Spitzenabfluss [%]	
	Mittelwert	Median	Mittelwert	Median
0-2	76,7	85,2	98,7	99,3
2-4	71,7	76,6	95,7	96,6
4-8	62,9	65	87,7	90,9
8-16	61,2	61,1	78,8	83,9
16-32	46,6	48,7	71,5	78,5
>32	49,9	46,8	70,4	76

Alle einzelnen gemessenen Regenereignisse wurden auf ihre Wiederkehrwahrscheinlichkeit, bezogen auf die KOSTRA Auswertungen des DWD (Deutscher Wetterdienst und Institut für Technisch-Wissenschaftliche Hydrologie 2016) für die entsprechende Rasterzelle in Hamburg, untersucht. In Abbildung 64 sind die einzelnen Regen bezüglich ihrer Wiederkehrintervalle eingeordnet. Die Linien entsprechen jeweils den Regenmengen, die während einer bestimmten Regendauer fallen müssen, um in ein Wiederkehrintervall eingeordnet zu werden. Wenn sich ein Punkt bzw. ein Regenereignis oberhalb einer bestimmten Linie befindet, ist dieser bzw. dieses demnach mindestens dem entsprechenden Intervall zuzuordnen. Demnach waren sieben gemessene Regen mindestens ein 1-jährlicher Starkregen und ein Regen mindestens ein 5-jährlicher Regen (29.06.2017, 60,4 mm in 2506 min). Bei einem Regen am 05.05.2015 (17,2 mm in 58 min) handelt es sich wahrscheinlich um einen Starkregen mit einem höheren Wiederkehrintervall, da für einige Minuten die Messkapazität des Regenmessers überschritten wurde und für diesen Zeitraum die maximal Messbare Intensität angenommen wurde. Die real gefallenen Werte überschritten diese jedoch.

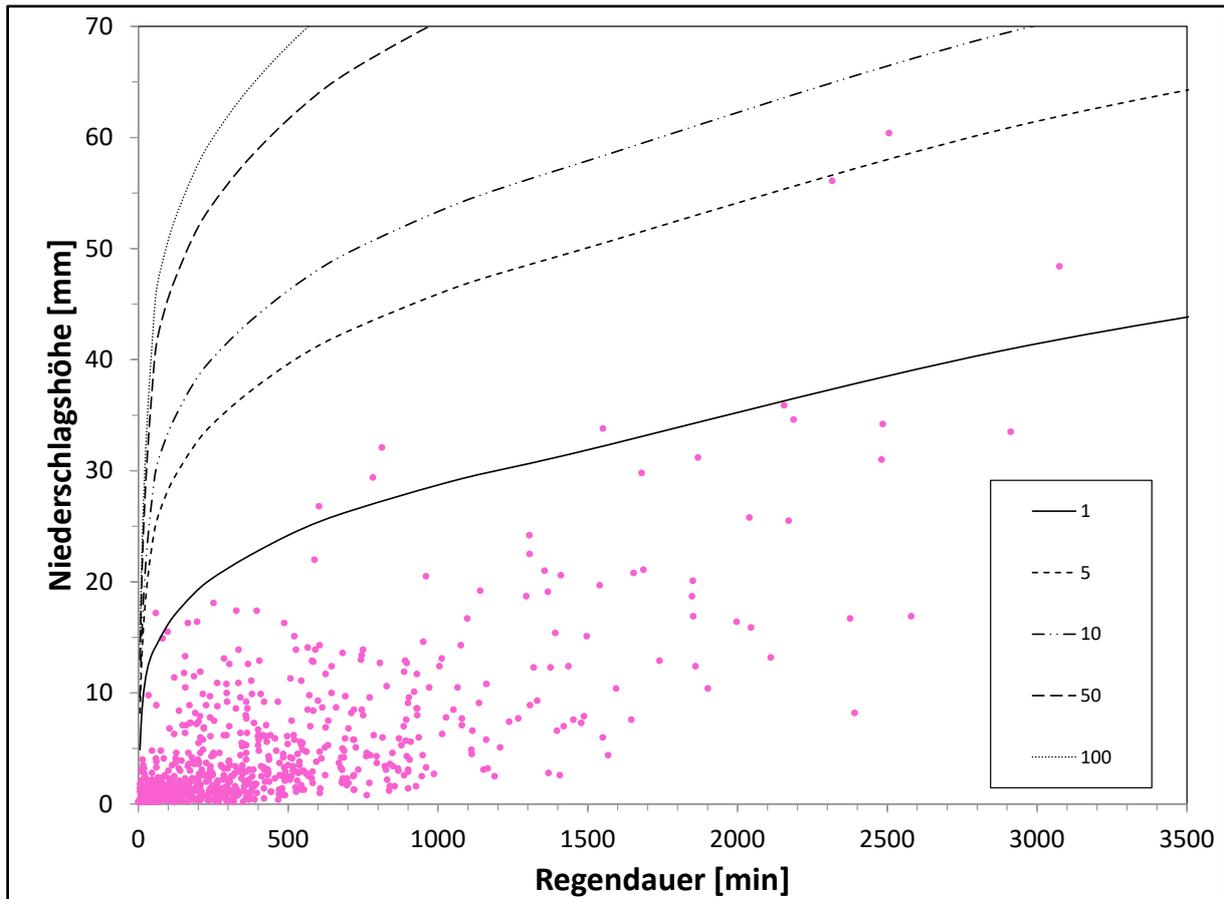


Abbildung 64: Darstellung aller auf dem Dach der HCU gemessenen Regenereignisse mit Regendauer und Regenmenge (Niederschlagshöhe und der Einordnung als Starkregenereignisse bezüglich der Wiederkehrintervalle für Hamburg nach KOSTRA 2010.

Für bestimmte als Starkregen identifizierte Ereignisse werden im Folgenden einige hydrologische Charakteristiken analysiert. Um die hydrologischen Charakteristiken unterschiedlicher Regenereignisse abzubilden wurden sommerliche Starkregen mit besonders kurzer (a) bzw. langer (d) Dauer und dementsprechend hoher und niedriger Intensität ausgewählt. Zusätzlich zwei sommerliche Starkregen, die innerhalb von wenigen Stunden nacheinander fielen (b), um den eventuellen Effekt der Vorfeuchte abzubilden. Als winterliche Regenereignisse wurden c und d abgebildet, um den Effekt der geringen saisonalen Verdunstungsleistung aufgrund geringerer Temperaturen, geringerer Interzeption außerhalb der Vegetationsperiode und hoher Vorfeuchte zu untersuchen. Die Regenereignisse sind in Tabelle 17 bezüglich ihrer Charakteristiken beschrieben, die Regen- und Abflussganglinien sind in Abbildung 65 (a-e) dargestellt. Das Ziel dieser Analyse war, bestimmte hydrologische Eigenschaften der Dachbegrünung anhand möglichst unterschiedlicher (Stark-)Regen zu untersuchen. Die Unterschiede bestehen dabei insbesondere in der Regendauer (kurze, intensive Starkregen vs. langanhaltende ergebnisreiche Regen) und der Saisonalität (Frühling/Sommer vs. Herbst/Winter).

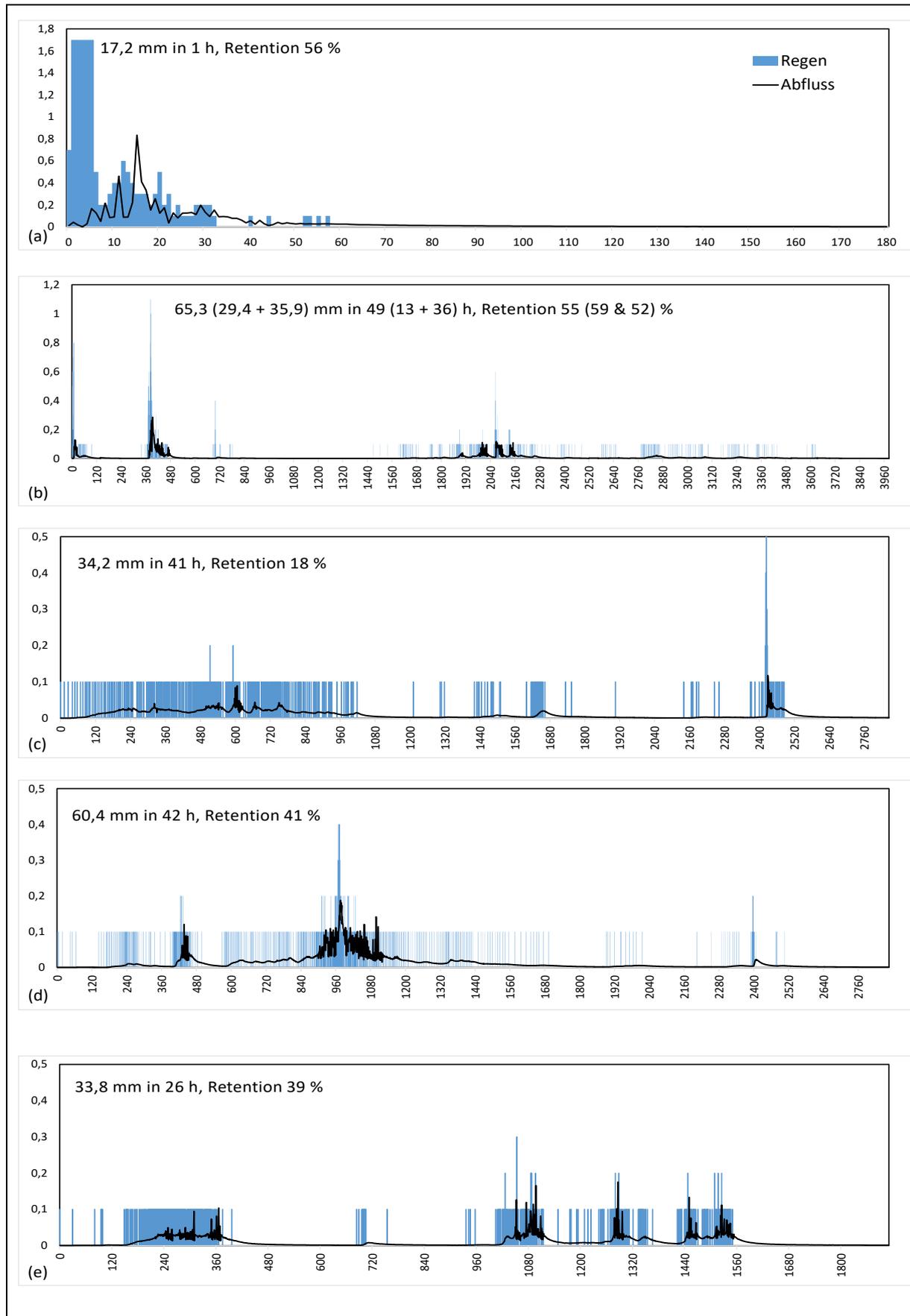


Abbildung 65: Regen (blau)- und Abflussganglinien (schwarz) ausgewählter Starkregeneignisse, die Daten sind in Tabelle 19. Die x-Achse beschreibt jeweils die Zeit in Minuten, die Y-Achse die gefallene Regenmenge in mm pro Minute.

Tabelle 17: Charakteristiken der Regenereignisse der in Abbildung 64 abgebildeten Abflussganglinien. Der Wert Regenmenge -7d bezeichnet die Regenmenge, die in Summe in den 7 Tagen vor dem zu betrachtenden Regenereignis gefallen ist.

Datum	Regenmenge [mm]	Regendauer [h]	Wiederkehrintervall [-]	Abfluss [mm]	Vorh. Trockenzeit (ADWP) [h]	Retention [%]	Reduktion Spitzenabfluss [%]	Abflussverzögerung [min]	Regenmenge - 7 d (mm)
05.05.2015 (a)	17,2	1	1,5	7,6	11	56	51	2	9,5
17.08.2015 (b)	29,4	13	1,5	11,9	31	59	74	8	16,2
18.08.2015 (b)	35,9	36	1	17,1	11	52	80	2	45,6
19.03.2017 (c)	34,2	41	1	28,0	18	18	76	3	7,2
29.06.2017 (d)	60,4	42	7	35,6	21	41	53	30	30,9
28.01.2020 (e)	33,8	26	1	20,6	9	39	41	2	3,5

Der Regen (b) wurde in der Darstellung (Abbildung 65b) aus zwei Ereignissen zusammengefasst, die an aufeinanderfolgenden Tagen fielen (17./18.08.2015). Sowohl bei dem kurzen, intensiven Regen (a, Sommer- kurze Dauer) als auch bei den langen, teilweise mehr als ein Tag andauernden Regen ist die anfängliche Verzögerung des Abflusses relativ kurz, auch im Vergleich zum Mittelwert (38 min) aller gemessener Regenereignisse. Das ist wohl auf den schnellen Abfluss des nicht-begrüntes Gebäuderiegels zurückzuführen, der direkt in den Kiesstreifen am Rand der Dachbegrünung entwässert und somit bei intensiven Regen schnellere direkte Abflüsse gemessen werden. Nur bei Regen (d)(Sommer- lange Dauer) ist eine deutliche Abflussverzögerung von 30 Min. gemessen worden, diese ist auf die anfänglich sehr geringen Regenintensitäten in den ersten etwa zwei Stunden zurückzuführen (0,7 mm in 140 min), die noch zu keinem gemessenen Abfluss führten (Abbildung 65d). Anhand der des kurzen, etwa 1h Starkregen (Abbildung 65a) lässt sich die Verzögerung der Abflussganglinie deutlich erkennen. Einige Minuten nach Regenbeginn setzt auch der Abfluss ein und hat nach etwa 15 Min. Verzögerung ebenfalls einen Scheitelpunkt. Danach nimmt der Abfluss entsprechend dem Verlauf der Regenintensität schnell ab und nach dem Ende des Regens wird dieser langsam geringer. Etwa 2h nach dem Regen fließen nur noch sehr geringe Mengen aus der Dachbegrünung ab, das Überschusswasser scheint also relativ schnell abgegeben zu werden. Insgesamt verbleibt mehr als die Hälfte der Regenmenge (56 %) im bzw. auf dem Gründach.

Bezüglich der Form der einzelnen Abflussganglinien ähneln sich alle abgebildeten Ereignisse. Die Abflussganglinie hat meist eine ähnliche, erheblich abgeschwächte, Form des Regenverlaufs. Bei Regenpeaks folgen nach einigen Minuten die Abflusspeaks, deren Intensität um meist deutlich mehr als 50% abgeschwächt sind. Bei langanhaltenden, nahezu konstanten Regenintensitäten wie in Abbildung 65 (c, d) kommt es (unabhängig von der Jahreszeit) nach einer anfänglichen Aufsättigung des Substrats auch zu einem nahezu konstanten, allerdings im Vergleich zur Regenintensität deutlich verringertem Abfluss. Das überschüssige Regenwasser wird demnach nicht in der gleichen Menge und Intensität wieder abgegeben, sondern wird zum Teil auch bei Sättigung des Substrats zwischengespeichert. Der Abfluss verringert sich jeweils auch nach Regenende relativ schnell und kommt nach einigen Stunden zum Erliegen. Auch bei relativ großen Regenmengen wie in Fall (b)(Sommer- aufeinander folgende Starkregen) mit insgesamt 65,3 mm Regen und einer Retention von 55% verringert sich der Abfluss aus der Dachbegrünung nach Regenende sehr schnell. In dem Beispiel wurde insgesamt nach dem Regen nur noch 1 mm Abfluss abgegeben, während der folgenden 30 h. Trotz des relativ ähnlichen Abflussverhaltens bezüglich der Form der Abflussganglinie bestehen deutliche Unterschiede im Gesamt-Rückhalt (18-59 %, Tabelle 17). Diese sind bei Betrachtung der Regen in Tabelle 17 nicht auf die Vorsättigung des Substrats zurückzuführen, da auch bei recht kurzen Trockenzeiten vor den Regen und ergiebigen Regenmengen in der jeweiligen Vorwoche hohe Retentionen gemessen wurden und somit eine entsprechende Vorfeuchte vorhanden war, wie z.B. bei (b)(Sommer- aufeinander folgende Starkregen) und (d)(Sommer – lange Dauer). Vielmehr scheint die saisonale Komponente bedeutend zu sein, da die beiden aus dem Winter bzw. zeitigen Frühling stammenden abgebildeten Regenereignisse (c) und (e) deutlich geringere Retentionen (18 bzw. 39 %) bei relativ geringen vorangehenden Regenmengen aufwiesen. Das deutet auf den Einfluss der im Sommer höheren Verdunstung und üppigeren Vegetation hin, welche durch erhöhte Interzeption im Sommer zusätzliche Wassermengen auf den Blattoberflächen zurückhalten kann.

3.3.1.3 Langfristige hydrologische Kennwerte in den Jahren 2017 – 2021 der Retentions Gründächer des RISA Pilotprojekts Am Weißenberge

Da sich die klimatischen Verhältnisse an diesen Dächern kaum im Vergleich zum Standort HCU unterscheiden beschränkt sich die Auswertung auf Effekte des monatlichen bzw. saisonalen Regenwasserrückhalt der unterschiedlichen Dachbegrünungen. Grundsätzlich ähneln sich die saisonalen Muster der Retentionsdachbegrünungen denen anderer Dachbegrünungen (Tabelle 18), auch der Extensivdachbegrünung auf dem HCU Gebäude. In den kühleren Monaten, insbesondere Oktober bis Februar, wird weniger Wasser zurückgehalten, teilweise deutlich unter 50 % der gefallen Regenmenge. Ab April

bis September werden dagegen meist über 80 % des Regens zurückgehalten, teilweise kommt es in einigen Monaten zu gar keinem Abfluss (z.B. im Mai). Das bedeutet, dass in diesen Zeiträumen nahezu der gesamte gefallene Regen verdunstet wird.

Tabelle 18: Monatliche Mittelwerte und Mittelwert des Gesamtzeitraums (2017 – 2021) des Regenwasserrückhalts in % der unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungen.

Monat	Regenwasserrückhalt Retentionsdachtypen [%]			
	Optigrün		Zinco	
	Mäander 60	WRB 85	Spacer 40	Spacer 100
1	38	33	33	34
2	58	40	50	71
3	76	62	69	74
4	88	84	78	81
5	100	100	98	96
6	100	99	81	79
7	96	76	70	68
8	100	93	86	84
9	99	70	70	70
10	75	39	44	41
11	77	44	34	35
12	48	32	13	11
Gesamtzeitraum	79	64	68	70

Während des betrachteten Gesamtzeitraums haben die unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungstypen 64 – 79 % des Regenwassers zurückgehalten, was Jahresabflussbeiwerten ψ_a von 0,36 – 0,21 entspricht. Die Substrathöhen auf den Retentionsdachbegrünungen entsprechen denen von Extensivdächern mit ψ_a von 0,5. Die Substratauflage der genutzten Retentionsdachtypen reicht von 6 – 9 cm (siehe Abbildung 13), die zusätzliche Retentionsleistung ist wohl auf die gefällelose Ausbildung, den gedrosselten Abfluss und die in der Vegetationsperiode erhöhte Verdunstungsleistung der im Vergleich zu konventionellen Extensivbegrünungen üppigeren Vegetation zurückzuführen. Bei Betrachtung der saisonalen Werte des Regenwasserrückhalts wird der jahreszeitliche Effekt ebenfalls deutlich (Abbildung 66). Die Unterschiede von Frühling/Sommer zu Herbst/Winter sind deutlich zu erkennen. Die zusätzliche Retentionsleistung scheint vor allem im Frühling und Sommer geleistet zu werden, da die Werte für den Regenwasserrückhalt im Winter denen von konventionellen extensiven Dachbegrünungen ähneln. Das ist v.a. auf die zusätzliche Verdunstungsleistung der Vegetation zurückzuführen. Grundsätzlich wird auf dem Mäander 60 Dach mit Daueranstau in allen Jahreszeiten am meisten Regenwasser zurückgehalten. In den Sommermonaten wird das Regenwasser zu nahezu komplett gespeichert und durch die Vegetation verdunstet, das gilt auch für das WRB 85 mit Daueranstau. Die Retentionsdächer Spacer 40 und Spacer 100 (ohne Daueranstau) verhalten sich bezüglich der Abflussvolumina erwartungsgemäß vergleichbar zu Extensivdächern. Die zusätzlichen hydrologischen Effekte

sind hauptsächlich auf die nicht vorhandene Dachneigung und die zeitliche Verzögerung der Abflüsse durch die Drosselung im Dachablauf zurückzuführen.

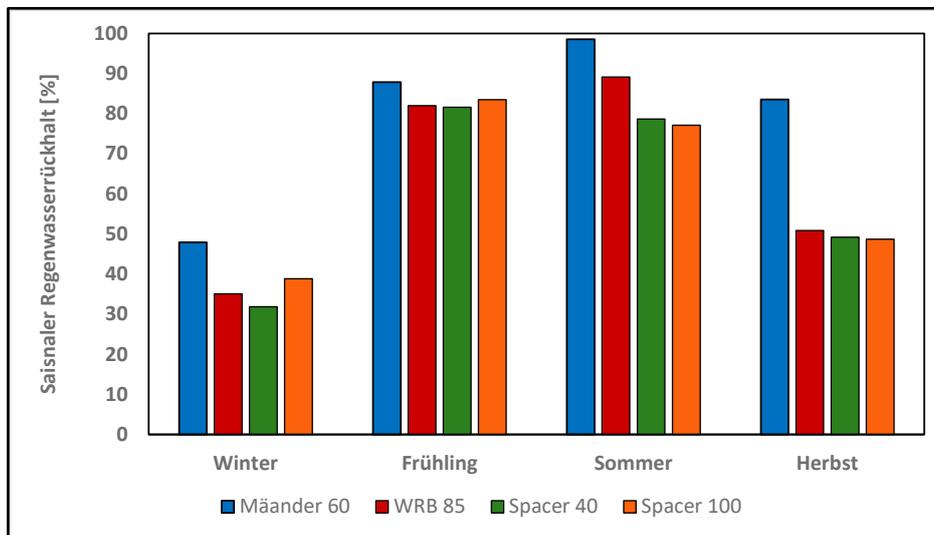


Abbildung 66: Jahreszeitliche Werte des Regenwasserrückhalts der unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungen (Winter = Dez, Jan, Feb; Frühling = Mär, Apr, Mai; Sommer= Jun, Jul, Aug; Herbst = Sep, Okt, Nov).

Die Unterschiede im Wasserdargebot werden auch anhand der Vegetationsentwicklung deutlich. Die Dächer mit Daueranstau zeigen üppigeren Bewuchs mit vermehrtem Auftreten von Gräsern und Kräutern, während auf den Typen ohne Daueranstau eher typische Vegetation für Extensivbegrünungen dominiert (Sedum-Arten).

3.3.1.3 Auswertung von einzelnen Niederschlagsereignissen an Retentions Gründächern des RISA Pilotprojekts Am Weißenberge

Die hydroklimatischen Verhältnisse bezüglich Regenmengen, -dauern etc. in den einzelnen Jahren, Jahreszeiten und Monaten ähneln denen am Standort HCU. Auf eine detaillierte Analyse wird diesbezüglich verzichtet. Im Fokus dieses Kapitels soll der Regenwasserrückhalt der unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungen bei einzelnen (Stark-)Regen stehen. Der Datensatz mit 208 Regenereignissen aus den Jahren 2017 – 2021 wurde dazu ausgewertet (nach Bereinigung von Fehlwerten etc.). Im Mittel halten die Retentionsdachbegrünungen bei allen gemessenen Regenereignissen 77 – 81 % zurück (Tabelle 19). Die Werte sind im Vergleich zu konventionellen extensiven Dachbegrünungen mit vergleichbarer Substratauflage als sehr gering einzuschätzen und liegen in Spannbreiten (min-max) zwischen 5 bis 100 %.

Tabelle 19: Mittelwert, Minimum und Maximum des Regenwasserrückhalts der unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungen, berechnet über alle gemessenen Regenereignisse.

Regenwasserrückhalt [%]	Mäander 60	WRB 85	Spacer 40	Spacer 100
Mittelwert	81	80	78	77
Minimum	5	8	7	5
Maximum	100	100	100	100

Die Effektivität des Regenwasserrückhalts bei unterschiedlichen Regenmengen kann für die bisher gemessenen Regenereignisse in Abbildung 67 nachvollzogen werden. Das grundsätzliche Verhalten ähnelt denen von konventionellen Extensivdachbegrünungen (Kapitel 3.3.1.2) mit der Abnahme von Regenwasserrückhalte bei größer werdenden Regenmengen, grundsätzlich im Vergleich in allen Kategorien höheren Werten für Rückhaltung auf den Dächern. Der Regenwasserrückhalt bei kleinen und mittleren Regenmengen (0 - 2 mm, 2 – 4 mm und 4 – 8 mm) liegt im Bereich von 79 – 88 %, in der Kategorie 8 – 16 mm noch zwischen 68 und 77 %. Bei Regen mit größeren Volumina über 16 - 32 mm sind die Abflussmengen größer (Regenrückhalt zw. 42 – 62 %). Die Werte für die Kategorie > 32 mm basieren auf nur einem gemessenen Regenereignis, wodurch diese nur wenig aussagekräftig ist.

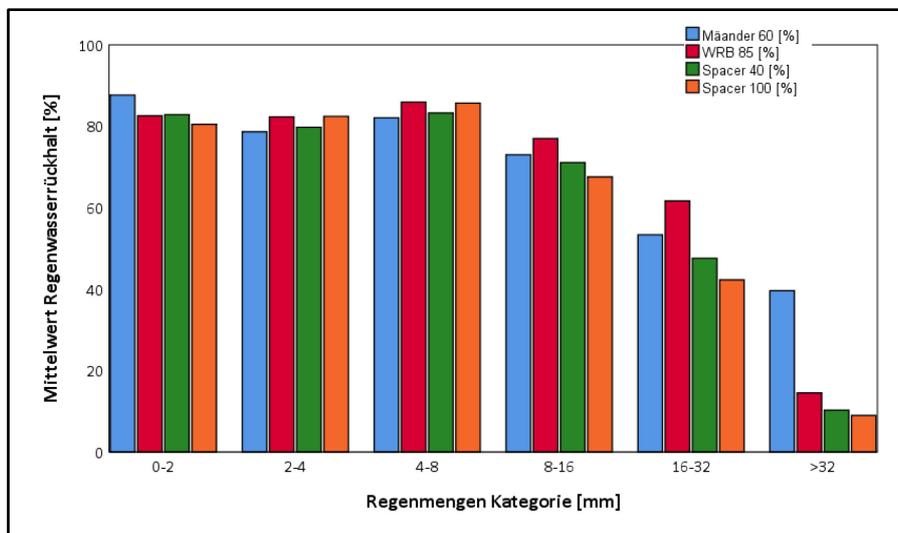


Abbildung 67: Werte des mittleren Regenwasserrückhalts von einzelnen Regenereignissen für die unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungen, in Abhängigkeit von unterschiedlichen Regenmengen-Kategorien.

Auch bei den Einzelregen zeigt sich ein deutlicher saisonaler Unterschied bei den Mittelwerten des Regenwasserrückhalts für einzelne Regenereignisse (Abbildung 68). Im Sommer und Frühling wurde im Mittel mehr Wasser pro Regenereignis auf den Retentionsdachbegrünungen zurückgehalten (> 87 – 99 %) als im Herbst (72 - 83 %) und Winter (53 – 60 %).

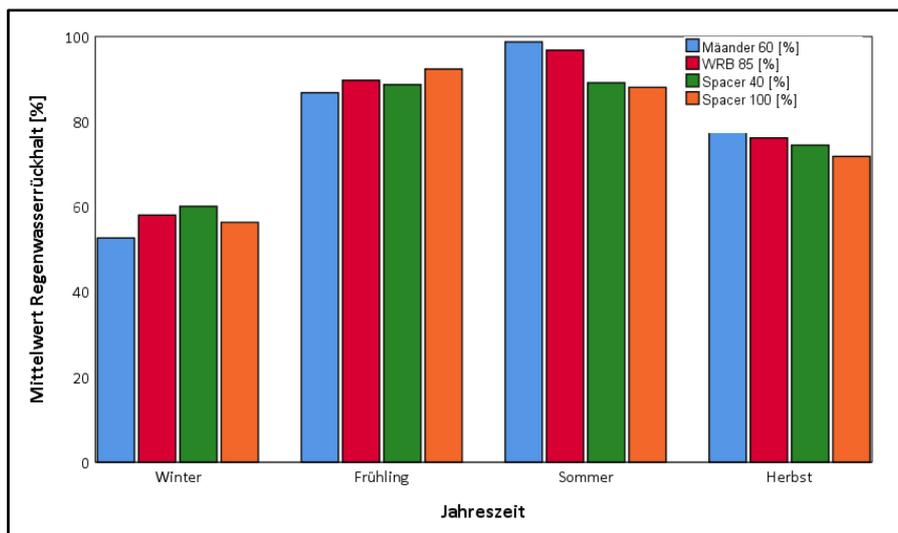


Abbildung 68: Jahreszeitliche Mittelwerte des Regenwasserrückhalts von einzelnen Regenereignissen der unterschiedlichen Retentionsdachbegrünungen (Winter = Dez, Jan, Feb; Frühling = Mär, Apr, Mai; Sommer= Jun, Jul, Aug; Herbst = Sep, Okt, Nov).

Neben dem vergleichsweise hohen langfristigen und ereignisbezogenen Retentionsvermögen haben alle Typen eine im Vergleich zu konventionellen Extensivbegrünungen zusätzliche Wirkung der Abflussdrosselung und längere Verzögerung der Abflüsse (Tabelle 20). Die Verzögerungen des nach einem Regen einsetzenden Abflusses von den Dächern beträgt im Mittel zwischen 157 und 442 Minuten (2,5 – 7,5 h). Saisonale Unterschiede sind wiederum deutliche zu erkennen, die auf die erhöhte Evapotranspiration im Sommer und bei den Dächern mit Daueranstau auf die Speicherwirkung, Entleerung des Speichers durch Verdunstung und bei Regen Auffüllen des Speicherraums (3 – 4 cm) bis zum einsetzenden Abfluss zurückzuführen ist.

Tabelle 20: Mittelwert der zeitlichen Verzögerung (in min) des Abflusses gegenüber des zugehörigen Regens über den gesamten Messzeitraum und über Sommer (Jun, Jul, Aug) und Winter (Dez, Jan, Feb).

Abflussverzögerung [min]	Mäander 60	WRB 85	Spacer 40	Spacer 100
Mittelwert	442	295	182	157
Sommer	649	548	267	256
Winter	160	55	73	52

Im Winter sind die Verzögerungszeiten für alle Typen vergleichbar, wobei das Mäander 60 Dach auch hier höhere Werte liefert. Die geringen Unterschiede zwischen Dächern mit und ohne Daueranstau sind auf die in den kühlen Monaten außerhalb der Vegetationsperiode fehlende Entleerung des Speicherraums durch die Evapotranspiration der Pflanzen zurückzuführen, wodurch der Speicher meist ge-

füllt ist und es nach Sättigung des Substrats auch meist direkt zum Abfluss kommt. Die zeitliche Verzögerung der Abflüsse gegenüber dem einsetzenden Regen kann für die Überbrückung der „Stresszeit“ von Kanalisationen (ca. 2 h) unmittelbar nach Starkregeneignissen der Hauptgrund für die Nutzung von Retentionsdächern mit Abflussdrosselung sein.

Am Beispiel eines 30-jährlichen Starkregens vom 27.08.2019 ist das Verhalten der vier Retentionsdachbegrünungen bei kurzen, intensiven Extremereignissen zu erkennen (Abbildung 69). Dieses Ereignis ist nicht in die vorangegangenen Analysen der Einzelereignisse eingegangen, da zu dem Zeitpunkt der Regenmesser am Standort defekt war und nur Ereignisse mit direkt vor Ort gemessenen Regen ausgewertet wurden. Die Regendaten für dieses Ereignis stammen von der DWD Station Fuhlsbüttel, welche sich in etwa 2 km Entfernung befindet. Neben den sehr hohen Rückhaltevolumina (66 – 100 % Retentionsdächer, 50% Extensivdach) sind an den Summenkurven der Retentionsdächer nach dem Einsetzen des Abflusses, an der geringen Steigung der der Abflusskurven, geringe und nahezu konstante Abflussraten erkennbar. Im Vergleich zum Abfluss des ebenfalls am Standort gemessenen Extensivdachs (schwarze Linie in Abbildung 69) ist die zusätzliche Drosselwirkung deutlich erkennbar. Das Extensivdach hält insgesamt etwa die Hälfte des Starkregens zurück, sobald allerdings die Wasserspeicherkapazität erreicht ist, wird, wie am steilen Anstieg der Kurve zu erkennen ist, das Überschusswasser mit geringerer Zeitverzögerung abgegeben.

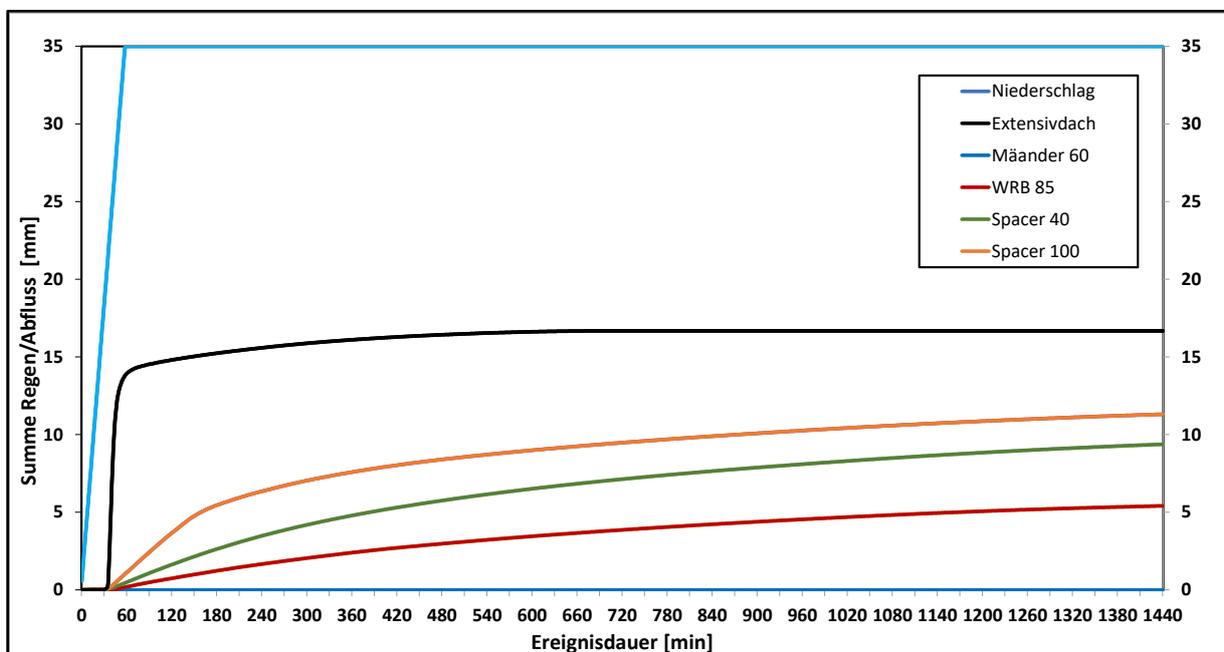


Abbildung 69: Summenkurven der untersuchten Retentionsdachbegrünungen im Vergleich zum Regen und einem Extensivdach am selben Standort von einem 35 mm Regen am 27.08.2019. Die Regendaten der sind stündliche Daten der naheliegenden DWD-Station Fuhlsbüttel.

Die eingebauten Drosseln der Retentionsdachtypen bedingten zusätzliche jahreszeiten-unabhängig sehr geringe Abflussintensitäten von im Mittel ca. 1 l/s*ha. Das bedeutet, dass wenn Überschusswasser abfließt, dann im Gegensatz zu versiegelten Flächen (oder ungedrosselten Abflüssen von Dachbegrünungen) über einen sehr langen Zeitraum, in den Beispielen etwa 24 Stunden.

3.3.2 Erstellung Vorhersagemodell – diagnostische Gleichung

Eine diagnostische Gleichung zur Bestimmung des Regenwasserrückhalts in Gründächern wurde aufgestellt, um die Beziehungen zwischen den abflussbestimmenden Zustandsgrößen anhand empirischer Beobachtungen physikalisch zu beschreiben. Mit der multiplen linearen Regression zur Erstellung des einfachen Vorhersagemodells kann die Wirksamkeit von Dachbegrünungen hinsichtlich Regenwasserrückhalt abgeschätzt und diejenigen Parameter statistisch identifiziert werden, die den größten Einfluss auf die hydrologische Effizienz der untersuchten Dachbegrünung haben. Als abhängige Variable wurde bei der Erstellung der Abfluss des jeweiligen Regenereignisses gewählt, da dieser dieselbe Dimension (Maß-Einheit) wie die Regenmenge hat und als Eingangsvariable für viele Bemessungsaufgaben dienen würde. Die Gleichung zur Beschreibung des linearen Zusammenhangs bzw. für das Regressionsmodell ist, wie schon in Kapitel 2.5 erläutert, Folgende:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n + \varepsilon$$

Y vorhergesagter bzw. erwarteter Wert für den Regenwasserabfluss aus dem Gründach

a₀ Wert für y wenn alle unabhängigen Variablen (x) den Wert 0 annehmen

x_{1,2,3,...,n} unabhängige Variablen, die zur Vorhersage herangezogen werden

ε Residuum, beschreibt den Fehler in der Vorhersagegenauigkeit, wird berechnet aus dem vertikalen Abstand zwischen gemessenem Datenpunkt und der berechneten Regressionsgeraden

Die Erstellung des Regressionsmodells wurde für die Datensätze aus der Meta-Analyse und die Messungen am Standort HCU-Dach durchgeführt.

3.3.2.1 Diagnostische Gleichung Meta-Analyse

Mit Hilfe der Methode der schrittweisen multiplen linearen Regression wurden für das Regressionsmodell der Abflüsse aus den Studien die Variablen Breitengrad, Dachgefälle, Substrattiefe und der Anteil der organischen Substanz aus der Analyse gelöscht, da sie keinen signifikanten Beitrag zur Erhöhung des R^2 lieferten. Zwei Modelle, die bezüglich des korrigierten R^2 und des Standardfehlers des Schätzers nahe beieinanderlagen, wurden wie folgt berechnet:

Multiple lineare Regressionsgleichung Modell 1 ($R^2 = 0,959$):

$$\text{Abfluss} = -3,325 + 0,776 \text{ Regenmenge} - 0,009 \text{ ADWP}$$

Multiple lineare Regressionsgleichung Modell 2 ($R^2 = 0,953$):

$$\text{Abfluss} = -4,478 + 0,777 \text{ Regenmenge}$$

Der für den Datensatz nicht vorhandene signifikante Einfluss der übrigen Variablen bedeutet, dass z.B. technisch-konstruktive Variablen keinen bedeutenden Einfluss auf das Vorhersagemodell haben. Aufgrund der nahezu gleich guten Anpassung des Modells an die gemessenen Daten bzw. fast gleichen Werte für R^2 wird in den folgenden Analysen aufgrund der einfacheren Darstellung und weniger Eingangsvariablen nur Modell 2 herangezogen. In Abbildung 70 ist die relativ gute Anpassung der Geraden an die Werte verdeutlicht. Die Interpretation der Gleichung ergibt, dass im Schnitt etwa 4,5 mm Regen fallen müssten, um überhaupt Abfluss aus den Gründächern zu generieren. Dieser Wert wird durch den Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Y-Achse definiert. Wenn die Regenmenge kleiner als dieser Wert ist, liefert das Modell einen negativen Abflusswert. Der zur Regenmenge zugehörige Regressionskoeffizient (0,777) bestimmt die Steigung der Geraden, d.h. mit jedem mm mehr Regen steigt der Abfluss um das 0,777-fache, also 0,777 mm. Wenn man die abzuziehenden 4,478 mm betrachtet heißt das, dass insbesondere bei ergiebigen Regenereignissen die Abflussreduktion der Dachbegrünungen im Verhältnis geringer ausfällt. Wenn man z.B. in die Gleichung eine Regenmenge von 10 mm eingibt, bekommt man einen Abfluss von 3,2 mm. Bei einem Regen von 100 mm ergibt sich ein Abfluss von 73,2 mm. Die entsprechenden Retentionen sind demnach 67 % bzw. 27 %.

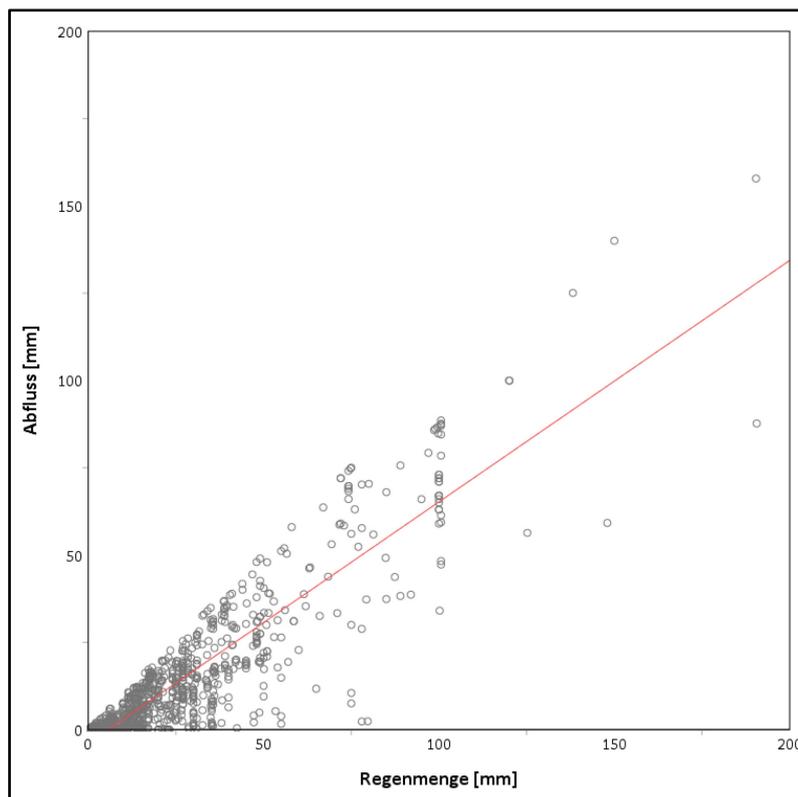


Abbildung 70: Darstellung des Regressionsmodells Nr. 2 (schwarze Linie) mit den dazugehörigen Datenpunkten für Regenmenge und Abfluss aus den analysierten Studien.

3.3.2.2 Diagnostische Gleichung Messwerte HCU-Dach

Mit Hilfe der Methode der schrittweisen multiplen linearen Regression wurden das Regressions-Modell der Abflüsse aus dem HCU-Gründach mit den meteorologischen Umweltbedingungen als Variablen gebildet. Die Variablen waren Regenmenge, Regendauer, ADWP, Regenintensität und Tagesmitteltemperaturen, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung, jeweils gemittelt über 1 Tag, die vorangegangenen 3 Tage und die vorangegangenen 7 Tage. Für die Modellbildung wurden in diesem Fall u.a. die Variablen Regendauer und -intensität ausgeschlossen, da sie keinen signifikanten Beitrag zur Modellbildung leisteten. Die Modelle, die bezüglich des korrigierten R^2 und des Standardfehlers des Schätzers nahe beieinanderlagen, wurden wie folgt berechnet:

Multiple lineare Regressionsgleichung Modell 1 ($R^2 = 0,86$):

$$Abfluss = -0,425 + 0,498 \text{ Regenmenge}$$

Multiple lineare Regressionsgleichung Modell 2 ($R^2 = 0,871$):

$$Abfluss = -3,534 + 0,493 \text{ Regenmenge} + 0,4 \text{ rel. Luftfeuchte } 3d$$

Multiple lineare Regressionsgleichung Modell 3 ($R^2 = 0,874$):

$$\text{Abfluss} = -4,209 + 0,492 \text{ Regenmenge} + 0,4 \text{ rel. Luftfeuchte } 3d + 0,198 \text{ Windgeschw. } 3d$$

Multiple lineare Regressionsgleichung Modell 4 ($R^2 = 0,875$):

$$\text{Abfluss} = -3,747 + 0,492 \text{ Regenmenge} + 0,36 \text{ rel. Luftfeuchte } 3d + 0,18 \text{ Windgeschw. } 3d - 0,00003655 \text{ ADWP}$$

Multiple lineare Regressionsgleichung Modell 5 ($R^2 = 0,875$):

$$\text{Abfluss} = -2,647 + 0,494 \text{ Regenmenge} + 0,028 \text{ rel. Luftfeuchte } 3d + 0,135 \text{ Windgeschw. } 3d - 0,00004355 \text{ ADWP} - 0,023 \text{ Temperatur } 7d$$

Aufgrund der nahezu gleich guten Anpassung des Modells an die gemessenen Daten bzw. fast gleichen Werte für R^2 wird in den folgenden Analysen aufgrund der einfacheren Darstellung und weniger Eingangsvariablen nur Modell 1 herangezogen. In Abbildung 71 ist die Anpassung der Geraden an die Werte verdeutlicht. Der Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Y-Achse ist mit -0,425 deutlich geringer als bei den Werten aus der Meta-Analyse. Das wird bedingt durch die relativ schnelle Abflusskomponente des unbegrünten Dachriegels, der auch bei sehr geringen Regenmengen schon Abflüsse generiert. Dieser im Vergleich geringe Y-Achsenabschnitt (-0,425) und die geringe Steigung der Geraden (0,498) bedingen ein insgesamt nur gering sinkendes modelliertes Retentionsvermögen der Dachbegrünung mit größer werdenden Regenmengen. Wenn z.B. wieder in die Gleichung eine Regenmenge von 10 mm eingibt, bekommt man einen Abfluss von 4,6 mm. Bei einem Regen von 100 mm ergibt sich ein Abfluss von 49,4 mm. Die entsprechenden Retentionen sind demnach 54 % bzw. 51 %. Der Vergleich zu den entsprechenden Werten des Modells aus der Studien-Datenbank (67 % bzw. 27 %) und die gegenüberstellende Betrachtung beider Regressionsmodelle in Abbildung 72 machen die grundsätzlichen Unterschiede deutlich. Während das Modell aus den Studien-Daten (rot) bei geringen Regenmengen sehr geringe Abflüsse und bei hohen Regenmengen größere Abflussmengen und dementsprechend geringere Retentionen prognostiziert, sind die Abflussmengen beim Modell des HCU-Dachs meist im Bereich von 50 % der Regenmengen. Die Retentionswerte des HCU-Modells bleiben also auch bei sehr geringen und auch hohen Regenmengen in etwa auf dem gleichen Niveau, bei etwa 50 %. Das würde bedeuten, dass beim Modell für das HCU-Dach die prognostizierten Abflusswerte nur wenig von der Höhe Regenmenge abhängig sind, also auch bei sehr ergiebigen Regenereignissen ähnliche Retentionswerte liefert wie bei vergleichsweise kleinen Regen.

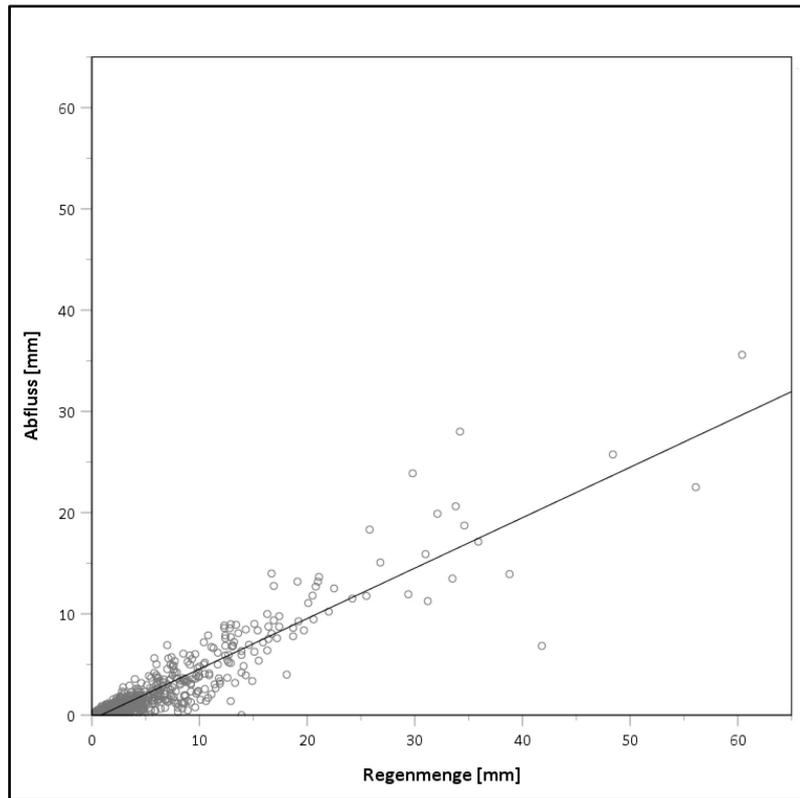


Abbildung 71: Darstellung des Regressionsmodells Nr. 1 (schwarze Linie) mit den am HCU-Dach gemessenen Datenpunkten für Regenmenge und Abfluss.

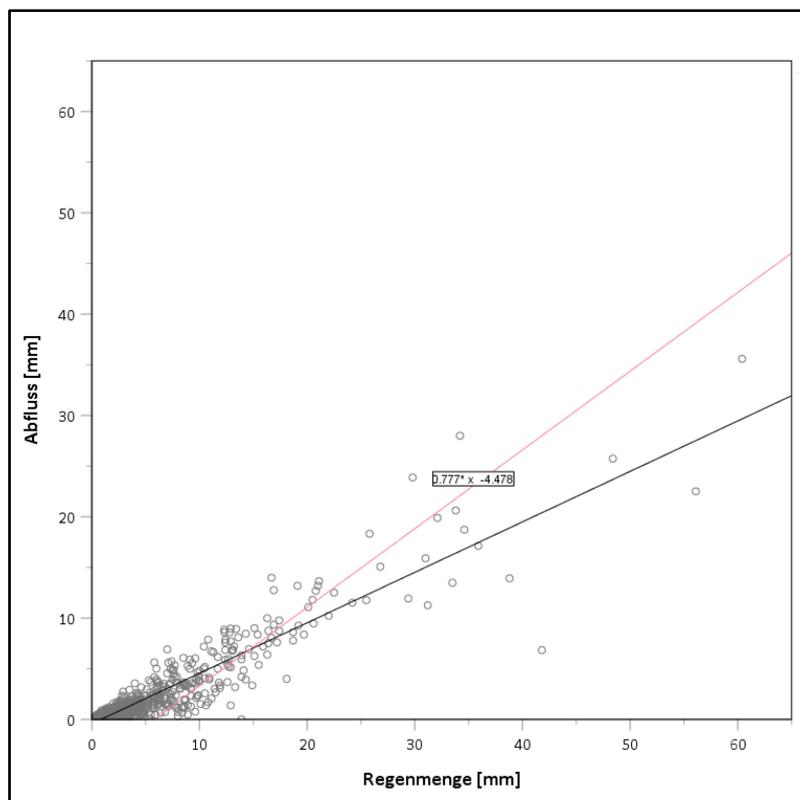


Abbildung 72: Vergleich der Regressionsgeraden für die Werte der Meta-Analyse (rot) und vom HCU-Dach (schwarz).

Zur Abschätzung der Anpassungsgüte des Modells wurden die gemessenen Werte mit denen des Modells verglichen. Für jedes Regenereignis wurde die Abfluss-Differenz wie folgt gebildet:

$$\Delta_Q = Q_{HCU} - Q_{Modell}$$

Δ_Q Abflussdifferenz gemessene Werte – Vorhersagemodell

Q_{HCU} Abflusswert HCU-Gründach

Q_{Modell} mittels Regressionsmodell berechneter Abflusswert

Die Differenzen zwischen Messwerten und Vorhersage mittels Regressionsmodell (= Residuen) sind als Histogramm in Abbildung 73 abgebildet. Die Differenz Δ_Q nimmt Werte in einem Bereich von -13,55 mm bis +11,4 mm an. Etwa 80 % der Werte von Δ_Q befinden sich im Bereich zwischen -1 mm und +1 mm. Das heißt dass der Unterschied von Messung zum Modell in 80 % der Fälle unter 1 mm läge. Es besteht ein Übergewicht an Δ_Q in positiver Richtung, etwa 50 % der Werte liegen bei 0-1 mm. Das Regressionsmodell unterschätzt also in den meisten Fällen den tatsächlich gemessenen Abfluss in geringem Ausmaß.

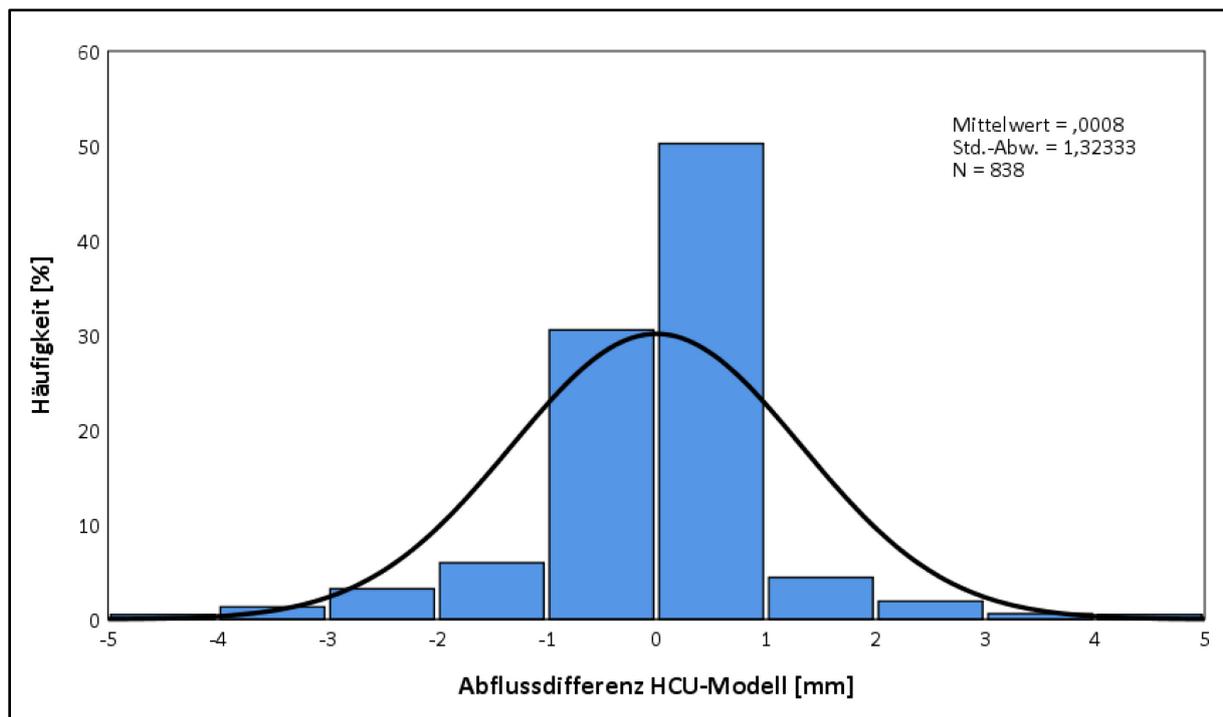


Abbildung 73: Histogramm der Häufigkeiten (in %) der Differenzen Δ_Q zwischen Messung am HCU-Dach Q_{HCU} und Regressionsmodell Q_{Modell} . Zusätzlich ist die Normalverteilungskurve dargestellt.

Die Modell-Performance ändert sich im Jahresverlauf nach Abbildung 74 nach einem deutlichen Muster. In den Winter- und Herbstmonaten (Oktober bis Februar) sind die gemessenen Abflusswerte größer als die modellierten, in den wärmeren Monaten März bis September ist das Gegenteil der Fall. Die

Abflussdifferenzen Δ_Q sind bei größeren Regenereignissen erwartungsgemäß deutlich größer als bei kleineren Regenereignissen (Abbildung 75). Einerseits sind die Werte an sich größer, sodass auch „Fehler“ bzw. Differenzen von teilweise größer als 5 mm möglich und andererseits sind in die Modellerstellung, also in die Regression, deutlich weniger größere Werte für Regenmengen eingegangen. Dadurch kann die Anpassung bei größeren Regenereignissen weniger gut sein. Wie in Abbildung 75 zu sehen sind die mit Abstand größten Abweichungen von der Regressionsgeraden nur bei Regenereignissen > 32 mm zu erkennen. Von dieser Regenmengenkategorie sind nur 11 Werte mit einer relativ großen Streuung in den Abflüssen (6,8 – 35,6 mm) vorhanden, wodurch die weniger gute Anpassung zum Teil erklärt werden kann.

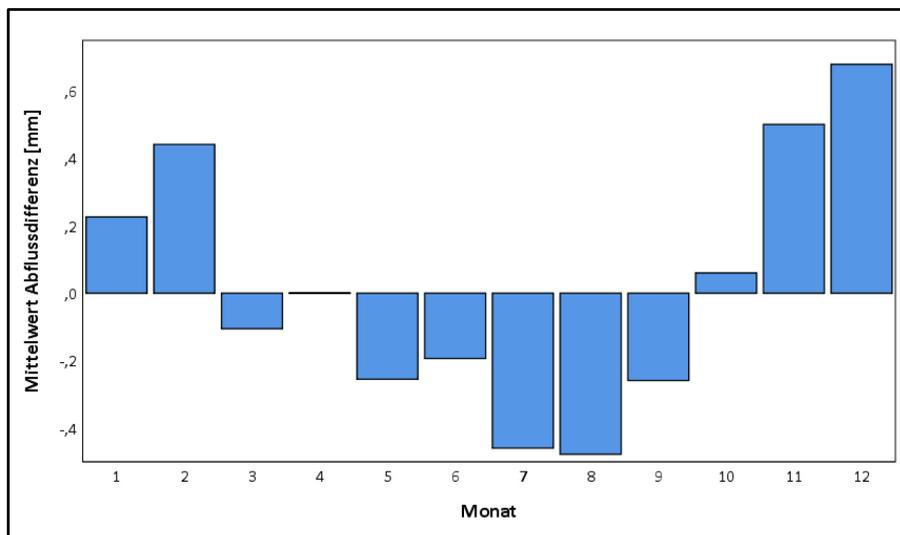


Abbildung 74: Monatliche Mittelwerte der Abflussdifferenzen einzelner Regenereignisse zwischen Messwerten und Regressionsmodell.

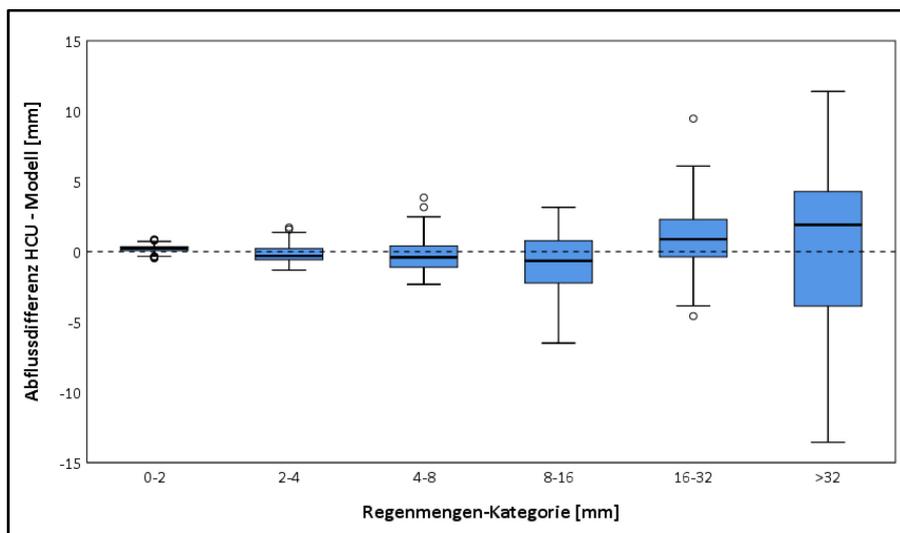


Abbildung 75: Abflussdifferenzen Messung-Modell in verschiedenen Regenmengenkategorien.

4. Regelwerke: Vergleich - Empfehlungen

Anhand der in Kapitel 1.4.1 eingeführten Regelungen zur quantitativen Erfassung bzw. Berechnung von Wasserwirtschaftlichen Effekten von Dachbegrünungen in nationalen und internationalen Leitlinien bzw. Regelwerken soll zunächst ein beispielhafter Vergleich einiger Berechnungsvorschriften anhand eines Beispielgebäude/-grundstücks durchgeführt werden. Die Beurteilung von Regelwerken bezüglich der Berechnungsvorschriften erfolgt anhand des Vergleichs mit gemessenen Werten am HCU-Dach. Ein ermittelter mittlerer Abflussbeiwert für die Retentionsdachbegrünungen des RISA Pilotprojekts Am Weißenberge (im folgenden Ψ_{RISA} genannt) wird zusätzlich als Vergleich hinzugezogen, um die wasserwirtschaftliche Wirkung unterschiedlicher Gründachtypen darzustellen. In den folgenden Berechnungen wird für Ψ_{RISA} ein Wert angenommen, der sich als Durchschnitt aus den mittleren Abflussbeiwerten der vier unterschiedlichen Retentionsdachtypen ($\Psi_{\text{M}} = 0,19/0,20/0,22/0,23$; siehe Tabelle 19) berechnet ($\Psi_{\text{RISA}} = 0,21$). Für weitere Details der Auswertungen des Pilotprojekts siehe Kapitel 3.3.1.3. Die folgende Tabelle fasst die genutzten hydrologischen Eingangsparameter der Vergleichsrechnungen zusammen.

Tabelle 21: Hydrologische Eingangsparameter der vergleichenden Berechnungen.

Regenwasserabfluss Berechnungsverfahren	Parameter/Gleichung
Abflussbeiwertverfahren DWA/FLL	$C_S = 0,5$
Mittlerer Abflussbeiwert RISA Retentions Gründächer	$\Psi_{\text{RISA}} = 0,21$
Regressionsmodell HCU Dach	$V_{\text{HCU}} = -0,425 + 0,498 N$
Regressionsmodell Meta-Analyse	$V_{\text{MA}} = -4,478 + 0,777 N$
SCS-Verfahren Portland	$CN_{\text{PO}} = 61$
SCS Verfahren Philadelphia	$CN_{\text{PH}} = 86$

Regenmengen N bzw. $r_{(D, X)}$ nach KOSTRA 2010:

$$r_{(5,2)} = 6,3 \text{ mm} \quad r_{(15,5)} = 15,1 \text{ mm} \quad r_{(5,30)} = 11,9 \text{ mm} \quad r_{(60,100)} = 46,2 \text{ mm}$$

4.1 Berechnung Gesamtabfluss von Dachbegrünungen

Als Beispiel-Gebäude soll das bereits verwendete HCU-Dach genutzt werden bzw. die Teilfläche, die auch im Rahmen der Untersuchungen zum Regen- und Abflussmonitoring genutzt wurde. Wie in Kapitel 2.4.3 beschrieben wurde der Abfluss vom Gründach von einer Teilfläche von insgesamt 598 m² gemessen, wovon etwa 130 m² (22 % der Fläche) nicht begrünt sind (Abbildung 76). Dementsprechend wurden die Abflussbeiwerte und CN-Werte angepasst. Die verglichenen Berechnungsverfahren umfassen die Berechnung des gesamten Direktabflusses zweier Starkregenereignisse mit insgesamt sechs Verfahren:

- Abflussbeiwertverfahren nach FLL/DWA (Ψ_m bzw. $C_s = 0,5$ für Aufbaudicke 6- 10 cm)
- Mittlere Abflussbeiwerte der RISA Retentionsgründächer ($\Psi_{RISA} = 0,21$)
- Regressionsmodell HCU-Dach
- Regressionsmodell Meta-Analyse
- SCS-Verfahren mit CN-Wert Vorgaben Portland ($CN_{PO} = 61$ für Gründach)
- SCS-Verfahren mit CN-Wert Vorgaben Philadelphia ($CN_{PH} = 86$ für Gründach)

Als Beispiel für ein Berechnungsverfahren mittels SCS-Verfahren wurde der CN-Wert für Dachbegrünungen entsprechend der Vorgaben der Stadt Portland ($CN_{GDPO} = 61$) (Bureau of Environmental Services 2020) und Philadelphia ($CN_{GDPH} = 86$) genutzt (siehe auch Kapitel 1.4.1). Die CN-Werte dienen zur Berechnung des Bodenspeichervermögens und können in Abhängigkeit vom Boden bzw. Substrat, der Nutzung und der Vorfeuchte von 0 bis 100 reichen (Maniak 2010).



Abbildung 76: Orthophoto Des HCU Gebäudes mit den Flächen des Einzugsgebietes der Gründach-Abflussmessungen (598 m², pink umrandet) und den nicht-begrüntem Bereichen (130 m², schwarz umrandet) (Orthophoto: © Landesbetrieb für Geoinformation und Vermessung LGIV Hamburg).

Für den mittleren Abflussbeiwert Ψ_m des Dachs entsprechend der DWA-A 117 (DWA 2013) und den Spitzenabflussbeiwert C_s nach den FLL-Richtlinien (FLL 2018) gilt:

$$\Psi_m = \frac{A_V * \Psi_V + A_{GD} * \Psi_{GD}}{A_V + A_{GD}} = \frac{130 \text{ m}^2 * 0,95 + 468 \text{ m}^2 * 0,5}{598 \text{ m}^2} = 0,6$$

Ψ_m mittlerer Abflussbeiwert der Gesamt-Dachfläche [-]

Ψ_V mittlerer Abflussbeiwert der versiegelten Dachfläche [-]

Ψ_{GD} mittlerer Abflussbeiwert der Gründachfläche [-]

A_V Versiegelte Fläche [m²]

A_{GD} Gründachfläche [m²]

Die Berechnung des CN Wertes für die betrachtete Teilfläche des HCU-Dachs erfolgt je nach genutztem Gründach-CN-Wert (Portland/Philadelphia) durch Gewichtung der begrünten und nicht-begrüntem Flächen:

$$CN_{PO} = \frac{A_V * CN_V + A_{GD} * CN_{GDPO}}{A_V + A_{GD}} = \frac{130 \text{ m}^2 * 98 + 468 \text{ m}^2 * 61}{598 \text{ m}^2} = 69$$

CN_{PO} CN-Wert der Gesamt-Dachfläche [-]

CN_V CN-Wert der versiegelten Dachfläche [-]

CN_{GDPO} CN-Wert der Gründachfläche nach den Vorgaben der Stadt Portland [-]

$$CN_{PH} = \frac{A_V * CN_V + A_{GD} * CN_{GDPO}}{A_V + A_{GD}} = \frac{130 \text{ m}^2 * 98 + 468 \text{ m}^2 * 86}{598 \text{ m}^2} = 89$$

CN_{PH} CN-Wert der Gesamt-Dachfläche [-]

CN_{GDPH} CN-Wert der Gründachfläche nach den Vorgaben der Stadt Philadelphia [-]

Als Bemessungsregen wurden für die vergleichenden Betrachtungen ein für die Bemessung von Regenrückhalteräumen bzw. dezentralen Regenwasserversickerungsanlagen in Deutschland nach der DWA-A 138 üblicher Bemessungsregen von 15 Min. Dauer und einer Häufigkeit 1-mal in 5 Jahren genutzt ($N = 15,1$ mm). Außerdem als Extrembeispiel ein 100-jährlicher Regen mit einer Dauer von einer Stunde ($N = 46,2$ mm). Die Daten wurden jeweils aus dem KOSTRA-DWD Daten (Deutscher Wetterdienst und Institut für Technisch-Wissenschaftliche Hydrologie 2016) für den Standort HafenCity in Hamburg übernommen. Die Berechnung des Direktabflusses, welcher in diesem Fall dem gesamten Abfluss vom Dach entspricht, erfolgt mit dem Abflussbeiwertverfahren über das Produkt aus Regenmenge und Abflussbeiwert:

$$V = N * \Psi_{m/RISA}$$

V Abflussvolumen [mm]

N Regenmenge [mm]

Die Berechnung des Direktabflusses mit den zuvor erstellten Regressionsmodellen für den Gründachabfluss erfolgt nach folgenden Formeln (siehe auch Kapitel 0):

$$V_{MA} = -4,478 + 0,777 N$$

$$V_{HCU} = -0,425 + 0,498 N$$

V_{MA} Abflussvolumen nach dem Regressionsmodell der Meta-Analyse [mm]

V_{HCU} Abflussvolumen nach dem Regressionsmodell der Gründachmessungen am HCU-Dach [mm]

Nach dem SCS-Verfahren wurde der Gesamtabfluss vom Dach wie folgt berechnet, wobei für den Anfangsverlust I_a der übliche Wert 0,2 verwendet wurde:

$$V = \frac{\left[\left(\frac{N}{25,4}\right) - \left(I_a \times \frac{10}{CN}\right) + \left(\frac{I_a}{10}\right)\right]^2}{\left[\left(\frac{N}{25,4}\right) + \left(\frac{1000 - I_a \times 10}{CN}\right)\right] - \left(10 - \frac{I_a}{10}\right)} \times 25,4$$

I_a Anfangsverlust [mm]

Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 77 gegenübergestellt. Besonders auffällig ist, dass die über den FLL/DWA-Abflussbeiwert und mit den Regressionsmodellen berechneten Abflussvolumina bei dem 5-jährlichen Regen (15,1 mm) relativ ähnlich sind (7,1 – 9,1 mm bzw. 40-53 % Retention), während die über das SCS-Verfahren ermittelten Werte deutlich geringer sind (1,7/4,9 mm bzw. 89/68%).

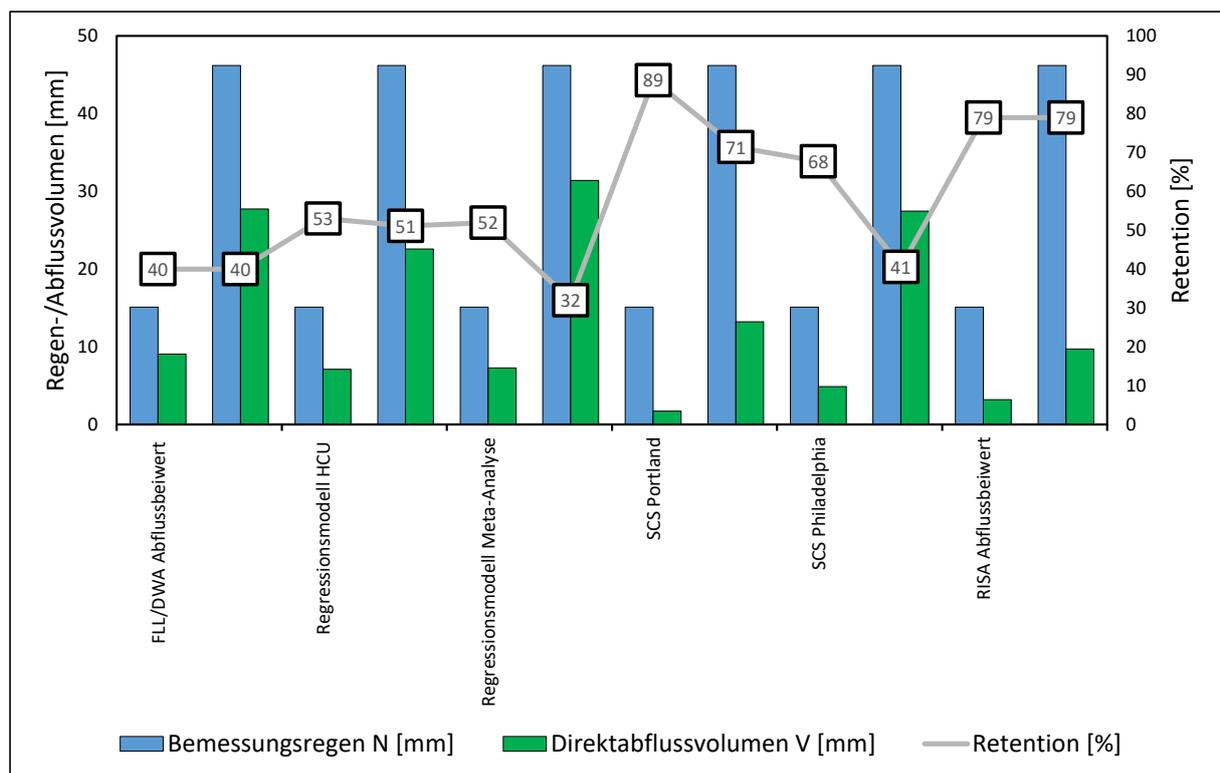


Abbildung 77: Balkendiagramm mit Vergleich der mit unterschiedlichen Berechnungsverfahren ermittelten Abflussvolumina (grün) vom Gründach in Abhängigkeit der Regenmenge (blau). Zusätzlich ist die daraus resultierende Retention in % als Linie eingezeichnet. Pro Berechnungsverfahren sind jeweils die 5- und 100-jährlichen Bemessungsregen und zugehörigen Direktabflüsse als Balken dargestellt

Die Abflussvolumina des 100-jährlichen Regens (46,2 mm) ähneln sind nach den Berechnungen mittels Abflussbeiwert, HCU-Regressionsmodell und SCS-Verfahren für Philadelphia (27,7 mm/40%, 22,6 mm/51% und 27,5 mm/41%), das Regressionsmodell aus der Meta-Analyse liegt über diesen Werten

(31,4 mm/32%) und das SCS-Verfahren für Portland wiederum deutlich unter den weiteren Berechnungen mit 13,2 mm Abfluss bzw. 71% Rückhalt. Die Berechnungen für Retentions Gründächer zeigten den erwarteten hohen Rückhalt, der unabhängig von der Regenmenge 79% beträgt und bis auf einen konkreten Fall (SCS Portland 5-jährlicher Regen, 89%) die deutlich höchste wasserwirtschaftliche Effektivität besitzt.

Als grundsätzliche Muster sind somit folgende Merkmale zu beschreiben:

- Deutlich geringere Berechnete Abflussvolumina bzw. höhere Retention von Dachbegrünungen durch das SCS-Verfahren mit dem CN-Wert von 61 (Portland)
- Nahezu konstante Abfluss-/Retentionswerte nach Berechnungen mittels Abflussbeiwert und HCU-Regressionsmodell unabhängig von Regenmenge
- Mit steigender Regenmenge deutlich zunehmende relative Abflussvolumina bzw. abnehmende Retentionen mittels Meta-Analyse-Regressionsmodell und SCS-Verfahren für Philadelphia
- Retentions Gründächer bieten in nahezu allen Fällen den geringsten Abfluss bzw. höchsten Rückhalt.

4.2 Berechnung Überflutungsnachweis nach DIN 1986-100

Die Norm DIN 1986-100, mit vollem Titel „Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056“, fordert Überflutungsnachweise, um eine kontrollierte schadlose Überflutung von Grundstücken zu gewährleisten. Damit wird auch den Folgen des Klimawandels und den daraus resultierenden voraussichtlich häufiger auftretenden Starkregenereignisse Rechnung getragen (Kind et al. 2021). Die Berechnung des für die schadlose Überflutung von Grundstücken benötigten Volumens geschieht über die Differenz zwischen der anfallenden Regenwassermenge bei einem mindestens 30-jährlichen Regenereignis und dem 2-jährlichen Bemessungsregen. Die entsprechende Formel lautet (Deutsches Institut für Normung 2016):

$$V_{\text{Rück}} = \left(r_{(D,30)} * A_{\text{ges}} - \left(r_{(D,2)} * A_{\text{Dach}} * C_{S,\text{Dach}} + r_{(D,2)} * A_{\text{FaG}} * C_{S,\text{FaG}} \right) \right) * \frac{D * 60}{10000 * 1000}$$

$V_{\text{Rück}}$ zurückzuhaltende Regenwassermenge [m³]

$r_{(D, X)}$ Regenmenge der entsprechenden Dauerstufe D und Jährlichkeit X [l/(s*ha)]

A_{Dach} gesamte Gebäudedachfläche [m²]

A_{FaG} gesamte befestigte Fläche außerhalb der Gebäude [m^2]

A_{ges} gesamte befestigte Fläche des Grundstücks [m^2]

$C_{S,x}$ der Spitzenabflussbeiwert nach Tabelle 9 in DIN 1986-100

D kürzeste maßgebende Regendauer [min], für die Bemessung der Entwässerung außerhalb der Gebäude nach DWA-A 118, Tab. 4, sonst $D = 5$ min. für einen Berechnungsregen, dessen Jährlichkeit einmal in zwei Jahren nicht unterschritten werden darf

Bei der Berechnung des Abflusses bei Starkregen ($T > 30$ a) erfolgt demnach keine Reduzierung der abfließenden Regenmengen durch Abflussbeiwerte. In den folgenden Berechnungsbeispielen wird jedoch auch der Sachverhalt betrachtet, dass für Gründächer auch im Falle von Starkregen hoher Wiederkehrintervalle eine Rückhaltung nachgewiesen wurde, sowohl bei Messungen auf dem HCU-Dach und den Retentionsgründächern in Hamburg, als auch in der Literatur. Um die möglichen Unterschiede in den Berechnungsvorschriften exemplarisch darzustellen, wurde das benötigte zurückzuhaltende Volumen über die Differenz der Abflussmengen des 2- und 30-jährlichen Regens mittels jeweiliger Berechnungsvorschriften (Ψ_{RISA} , SCS-Verfahren, Regressionsmodelle) ermittelt. Als Beispielgrundstück A_{ges} wurde ein $1000 m^2$ großes Grundstück mit dem bereits in dem vorherigen Kapitel als Berechnungsgrundlage verwendetem Teil des HCU-Gebäudes ($A_{Dach} = 598 m^2$) genutzt. Als A_{FaG} ($402 m^2$) wurde eine mit Plattenbelag großteils versiegelte Fläche mit einem Abflussbeiwert von 0,9 angenommen (Abbildung 78).

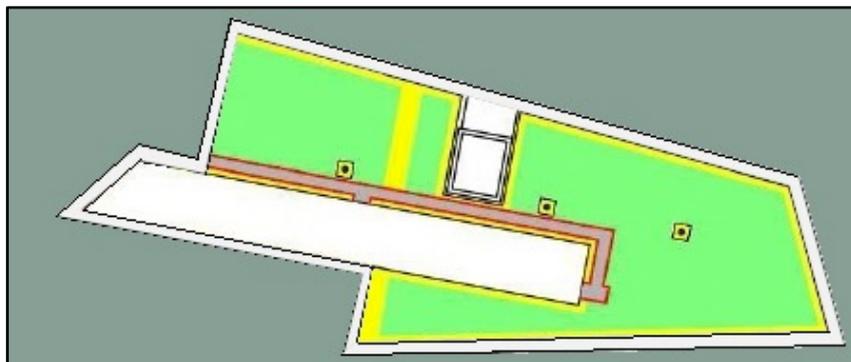


Abbildung 78: Skizze des für die Berechnung des Überflutungsnachweises angenommenen Grundstücksfläches. Das Gebäude entspricht dem Gebäudeteil des Einzugsgebiets der Abflussmessungen auf dem HCU-Dach ($598 m^2$), der umgebende graue Bereich stellt die angenommene Rest-Grundstücksfläche [$402 m^2$] mit Plattenbelag dar (nicht maßstabsgerecht, © fair-plants-system GmbH, T. Brinkmann, bearbeitet).

Als maßgebende Regendauer wurde $D = 5$ Min. angenommen. Die Regenmengen wurden wieder aus den KOSTRA-Auswertungen für das entsprechende Rasterfeld genommen (Deutscher Wetterdienst und Institut für Technisch-Wissenschaftliche Hydrologie 2016).

Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 79 dargestellt. Die schadlose Überflutung müsste im Berechnungsfall nach DIN 1986-100 demnach für 7,4 m³ (100 %) Regenwasser sichergestellt werden. Bei der einberechneten Reduzierung der Abflüsse durch Dachbegrünungen, auch beim 30-jährlichen Regen, würde dieses Volumen in allen Fällen deutlich reduziert, es wären nur 34 – 63 % nötig. Die zum Teil auch in dieser Arbeit nachgewiesene Abflussreduzierung von Gründächern auch bei größeren Starkregenereignissen würde dem Beispiel nach zu einer deutlichen Reduzierung der Grundstücksbezogenen Maßnahmen zum (temporären) Rückhalt von abfließendem Regenwasser führen. Am wenigsten Volumen wäre nach den Berechnungsverfahren des SCS mit dem CN für Portland und dem Abflussbeiwert der Retentions Gründächer Ψ_{RISA} notwendig.

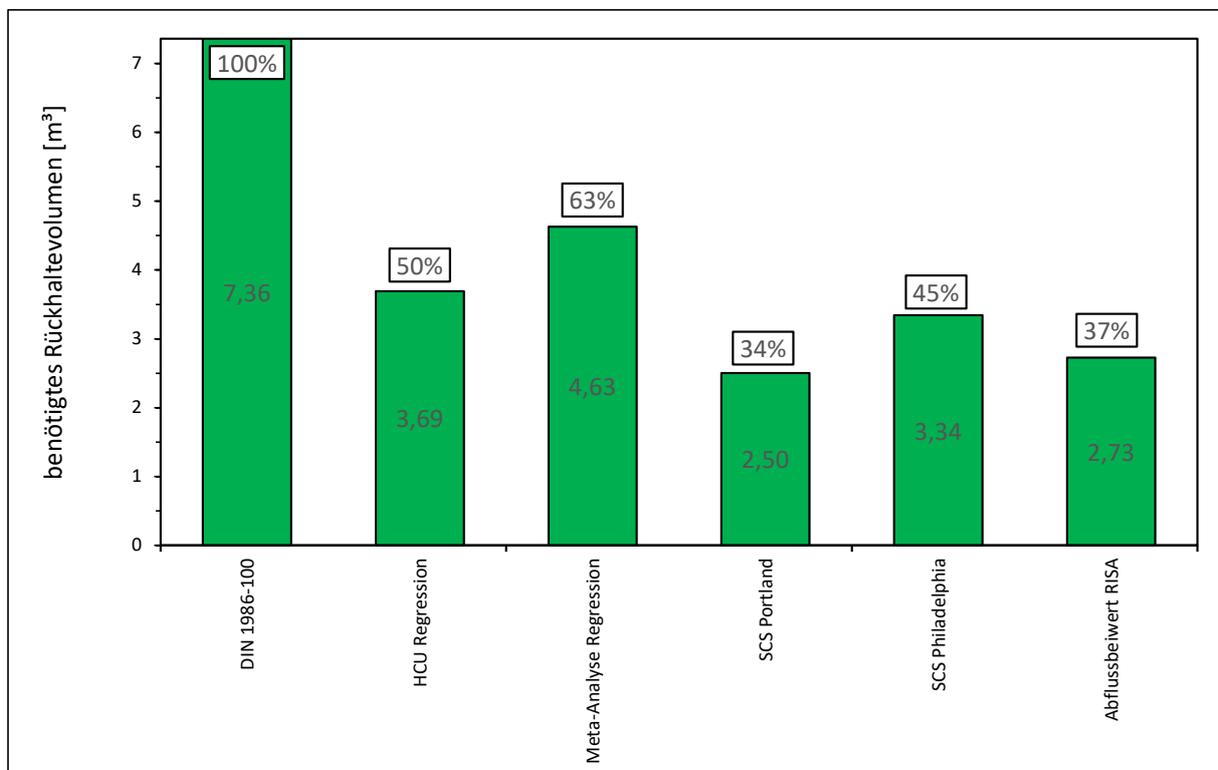


Abbildung 79: Berechnete auf dem Grundstück schadlos zurückzuhaltende Abflussvolumina (grüne Balken) für einzelne Berechnungsverfahren im Vergleich zum Verfahren nach DIN 1986-100. In den weißen Boxen über den Balken sind die dazugehörigen Prozentzahlen angegeben.

5. Reflexion der Klimafolgenanpassungspotenziale und Empfehlungen

5.1 Potenziale und deren Anwendung in der Praxis - Beantwortung der Forschungsfragen

5.1.1 Quantifizierung von Klimafolgenanpassungsleistungen

Die erste Forschungsfrage bezüglich der Quantifizierung von Klimafolgenanpassungsleistungen lautete:

„Welche Leistungen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels bezüglich Verminderung der urbanen Hitzeinsel und Verringerung des Überflutungsrisikos können Dachbegrünungen bieten? Sind diese für verschiedenen urbane Räume quantifizierbar?“

Die **hydrologischen Wirkungen bzw. Leistungen** von Dachbegrünungen sind Interzeption, Regenwasserrückhalt im Substrat, die Verdunstung des Regenwassers über Substrat- und Blattoberflächen der Pflanzen und die Verzögerung von Abflussbeginn und Abflussspitzen vom Dach und damit in jedem Fall eine Entlastung nachgelagerter Entwässerungssysteme. Die Quantifizierung der einzelnen Wirkungen ist nur in Spannbreiten sinnvoll, da je nach Vorbedingungen und technisch-ökologischen Gegebenheiten unterschiedliche Ausmaße zu erwarten sind. Im Mittel werden langfristig von unterschiedlichen Dachbegrünungstypen etwa 40 % in den Wintermonaten bis 73 % in den Sommermonaten zurückgehalten. Für einzelne Regenereignisse weisen die unterschiedlichen Parameter des Regenwasserrückhalts deutliche Streuungen auf (Regenwasserrückhalt 0 – 100 %, Spitzenabflussbeiwert 0 - >1, Verzögerung Abflussbeginn -8 – 2290 Min., Verzögerung Abflussmaximum 1- 2000 Min.). Im Mittel nehmen diese Werte aus den Literaturstudien Werte von 60 % Regenwasserrückhalt, einen Spitzenabflussbeiwert von 0,37 und Verzögerung von Abflussbeginn bzw. –maximum von 235 bzw. 250 Min. an.

Von besonderer Bedeutung ist in dem Zusammenhang der Nachweis, dass bei ergiebigen Niederschlägen sowohl langer als auch kurzer Dauer, einerseits im Rahmen des Pilotprojekts Am Weißenberge (Retentionsdachbegrünungen), andererseits aber auch auf dem Extensivdach der HCU eine erhebliche Retention nachgewiesen werden konnte. Das ist im Hinblick auf die Gefährdung durch Überflutungen und Hochwasser eine Aussage, die oft angezweifelt wurde und unzureichend in Regelwerken Beachtung findet bzw. nur mit Abflussbeiwerten, die bis zu einem 5-jährlichen Regen gelten (Richter und Dickhaut 2019). Um diesen Fakt zu hinterlegen sind in Tabelle 22 die den Regenwasserrückhalt bestimmenden Werte in Abhängigkeit der Regenmengen für das HCU-Dach aufgeführt. Demnach sind auch

bei ergiebigen Regenmengen ≥ 10 mm bzw. ≥ 30 mm im Mittel erhebliche Retentionsleistungen ($\geq 50\%$), Spitzenabflussreduktionen ($\geq 68\%$) und Verzögerungen des Abflusses (≥ 16 min) und des Spitzenabflusses (≥ 163 min) gemessen. Interessant ist in dem Fall die höhere Verzögerung der Abflussspitzen bei größeren Regenereignissen (\emptyset 131 min, 201 Min. bei ≥ 30 mm). Das hängt wahrscheinlich damit zusammen, dass die Regen ≥ 30 mm meist ergiebige, aber sehr langandauernde Ereignisse waren und eine geringere Intensität aufwiesen. Bisher konnten am Standort HCU keine bzw. nur sehr wenige Starkregen kurzer Dauer gemessen werden, weshalb die vorher getroffene Aussage bezüglich der wasserwirtschaftlichen Wirksamkeit bei konvektiven Starkregen kurzer Dauer nur bedingt gültig ist.

Tabelle 22: Mittelwerte der den Regenwasserrückhalt bestimmende Werte in Abhängigkeit der jeweiligen auf dem HCU-Dach gemessenen Regenmengen der Einzelereignisse unterschiedlicher Regendauer.

Faktor Regenwasserrückhalt	Alle Regenmengen	Regenmengen ≥ 10 mm, alle Regendauern	Regenmengen ≥ 30 mm, alle Regendauern
Retention [%]	70	53	51
Reduktion Spitzenabfluss [%]	93	73	68
Abflussverzögerung [min]	38	18	16
Verzögerung Spitzenabfluss [min]	131	163	201

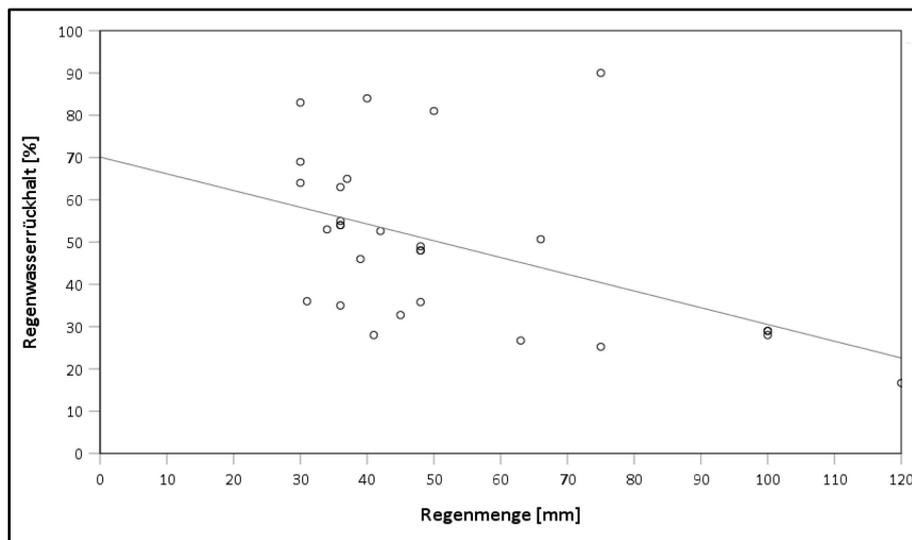
Diesbezüglich lagen jedoch Daten unterschiedlicher Dachbegrünungen aus der Literaturdatenbank vor. Die entsprechende Analyse der ergiebigen Regenereignisse der Datenbank ergab ähnliche Werte, d.h. ebenfalls deutliche Retentionen, Spitzenabflussreduktionen und Verzögerungen (Tabelle 23). Die genauere Betrachtung der kurzen Starkregen von ≥ 30 mm und ≤ 60 Min. Dauer, welche in Hamburg theoretisch höchstens einmal in 15 Jahren fallen, ergab keine deutlich schlechtere Performance.

Tabelle 23: Mittelwerte der den Regenwasserrückhalt bestimmende Werte in Abhängigkeit der jeweiligen Regenmengen, Werte stammen aus der Literaturdatenbank

Faktor Regenwasserrückhalt	Alle Regenmengen	Regenmengen ≥ 10 mm	Regenmengen ≥ 30 mm	Regenmengen ≥ 30 mm und Regendauer ≤ 60 min
Retention [%]	60	52	44	54
Reduktion Spitzenabfluss [%]	63	61	52	54
Abflussverzögerung [min]	235	256	200	62
Verzögerung Spitzenabfluss [min]	250	281	230	330

Die Retention ist im Mittel 54 % noch sehr hoch, die Spitzenabflussreduktion ist etwas geringer als bei kleineren Regenereignissen und beim HCU-Dach. Die Verzögerung der Spitzenabflüsse ist höher als bei kleineren Ereignissen. Lediglich die anfängliche Verzögerung der Abflüsse scheint mit im Mittel etwa 1 h deutlich geringer auszufallen.

Mit diesen Daten konnte nachgewiesen werden, dass es trotz großer Regenmengen und kurzer Dauer trotzdem deutliche Retentionsleistungen durch (extensive) Dachbegrünungen geben kann. Das gilt auch für die mit dem HCU-Dach vergleichbaren Extensivdächer in der Datenbank mit Substratauflagen von 60-100 mm. Deren mittlere Retention solcher Starkregen liegt bei 49%. Wie anhand des Streudiagramms in Abbildung 80 zu erkennen ist, sind insbesondere im Bereich von 30 – 50 mm Regenmenge deutliche Retentionen gemessen worden. Selbst von Ereignissen mit 100 mm in kurzer Zeit wurden noch etwa 30 % zurückgehalten.



Die Sonderform der Retentions Gründächer bietet noch bedeutend mehr Potenziale der Wasserwirtschaftlichen Wirksamkeit, sowohl hinsichtlich Regenwasserspeicherung als auch der Verzögerung von Abflüssen. Durch deren technische Besonderheit der gefällelosen Dachausführung, den Drainage- und Speicherelementen und der gezielten Drosselung von überschüssigem Regenwasser sind deutlich höhere Wirksamkeiten möglich. Diese können zudem gezielt angepasst werden durch die Konfiguration der Drosselöffnungen bezüglich Größe der Abflussöffnung und der Höhe der Drossel über der Dachabdichtung und dementsprechend einen langfristigen Anstaubereich schaffen. Die Potenziale gehen bei dieser Art Dachbegrünung noch über die bei dem Projekt Am Weißenberge gemessenen hinaus. Prinzipiell können diese nach wasserwirtschaftlichen Zielvorgaben gesteuert werden und somit theoretisch bis zu einem „abflusslosen“ Dach angepasst werden, wodurch die Verdunstungsleistung durch dauerhaften Anstau unterhalb der Substratebene maximiert würde.

Die qualitativen Aussagen zu den Regenwasserrückhalt bestimmenden Faktoren aus Kapitel 3.2.1 konnten in einigen Fällen auch quantitativ nachgewiesen werden. Was im Rahmen der quantitativen Analysen vorher nicht zu erwarten war, ist der große Einfluss der jeweiligen gefallenen Regenmenge auf die verschiedenen Faktoren des Regenwasserrückhalts. Dass die Regenmenge teilweise als einziger signifikanter Faktor ausgewiesen wurde, z.B. bei der Erstellung der Diagnostischen Modelle mittels multipler Regressionsanalyse, war u.a. aufgrund der in der Literatur vorherrschenden Annahme des erheblichen Einflusses der Substratauflage, nicht zu erwarten. Zu teilweise konträren Ergebnissen kamen z.B. Burszta-Adamiak et al. (2019), die keinen signifikanten Einfluss der Regenmenge auf die Retention von Dachbegrünungen feststellen konnten. Demgegenüber konnten sie ADWP und die tägliche Durchschnittstemperatur als Einflussfaktoren bestimmen (Burszta-Adamiak et al. 2019). Zumindest für die Jahre seit 2015 konnte der Zusammenhang für das HCU-Gründach als einziger signifikanter Faktor eindeutig nachgewiesen werden.

Auch wenn nicht alle Faktoren aus unterschiedlichen Gründen signifikante Werte in den statistischen Analysen lieferten, ist davon auszugehen, dass diese in bestimmten Fällen einen Einfluss auf das Regenwasserregime von Dachbegrünungen haben können. In einzelnen Studien wurde dies nachgewiesen. Zusammenfassend werden diese Faktoren hier noch einmal genannt, für die Zusammenhänge und hydrologischen Wirkungen sei auf Kapitel 3.2.1 verwiesen:

- Substratstärke,
- Vorgeuchte,
- Alter,
- Gefälle,

- Regenmenge und -intensität
- Jahreszeit bzw. Breitengrad
- Pflanzenarten sowie
- Substrattyp/-zusammensetzung.

Die Quantifizierbarkeit in unterschiedlichen urbanen Räumen spielt bisher in der Literatur eine untergeordnete Rolle im Sinne der hydrologischen Wirkungen auf Einzugsgebietsebene. In den in dieser Arbeit untersuchten Studien wurden meist Analysen anhand einzelner Dächer durchgeführt, wie auch an den Hamburger Beispielen. Für eine Übertragung auf größere Gebiete müssten die Potenziale von Dachbegrünungen mit hydrologischen Modellen oder großräumigen Messkampagnen in Gebieten mit flächendeckender Dachbegrünung nachgewiesen werden.

Die **stadtklimatischen Potenziale von Dachbegrünungen** bzw. Der Einfluss auf die Umgebungstemperatur ist im Straßenraum bzw. nahe des Bodens weniger stark zu spüren als bspw. direkt über dem Dach. Trotzdem sind deutliche Reduktionen der Temperaturen in der Umgebung von Gebäuden bzw. in gesamten Stadtteilen möglich. Tabelle 24 fasst die Werte aus den Studien zusammen. Mittelwert und Maximum der 24 h Durchschnittstemperaturen entsprechen dem Durchschnitt der Reduzierung der Tagesmitteltemperaturen über alle Studien bzw. dem Höchstwert der Reduzierung der Tagesmitteltemperaturen aus allen Studien. Die Werte für die maximale Abkühlung bzw. maximalem Temperaturunterschied zwischen begrünem und nicht-begrünem Zustand entsprechen dem Mittelwert aller Studien und dem Höchstwert aus allen Studien.

Tabelle 24: Mittelwert und Maximum der Änderung der Durchschnittstemperaturen und Maximaltemperaturen aus Studien, die die Veränderung der Umgebungstemperaturen im bodennahen Bereich gemessen oder modelliert haben.

	N	Mittelwert [°C]	Maximum [°C]
Reduzierung der 24 h Durchschnittstemperatur	57	-0,62	-1,80
Maximaler Abkühlung an einem Tag	138	-0,73	-3,80

Temperaturreduzierungen im bodennahen Bereich von einigen °C sind dementsprechend unter bestimmten Voraussetzungen durch Dachbegrünungen möglich. Dafür muss allerdings das Wasserdargebot für Pflanzen zur Verdunstungskühlung gegeben sein (Jim 2015). Hier ergibt sich durch Dachbegrünungen mit Daueranstaue (Retentionsdächer) oder zusätzlicher Bewässerung, z.B. mit Grau- oder Regenwasser, ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung stadtklimatischer Hotspots. Signifikanten Einfluss auf die Effektivität der Kühlung hat auch der Anteil begrünter Dächer im betrachteten Gebiet. Je

mehr Dächer begrünt sind, desto höher ist die Kühlungsleistung. Damit zusammenhängend ist der signifikante Effekt auf die räumliche Skala bedeutend, denn je kleiner der betrachtete städtische Raum der Untersuchungen in der Literaturdatenbank war, desto höher der Abkühlungseffekt. Das ist besonders für kleinräumige Hotspots von Bedeutung, wodurch die Dachbegrünung als eine mögliche Klimafolgenanpassungsmaßnahme einen Beitrag leisten könnte. Außerdem deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Kühlleistung im bodennahen Raum in aufgelockerten Gebieten deutlicher spürbar ist als in sehr dicht und hoch bebauten innerstädtischen Gebieten.

5.1.2 Abhängigkeiten zwischen Anpassungsleistungen und Rahmenbedingungen - Vorhersagemodell

Eventuelle Zusammenhänge zwischen Rahmenbedingungen und den hydrologischen Wirkungen wurden anhand eines linearen Modells zur Berechnung des Regenwasserabflusses aus Dachbegrünungen zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage untersucht:

„Welche Abhängigkeiten bestehen zwischen den konkreten Anpassungsleistungen und den (klimatischen) Rahmenbedingungen? Wie sind diese Abhängigkeiten in ein einfaches Vorhersagemodell zu übersetzen?“

Das Regressionsmodell lieferte ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß mit $R^2 = 0,86$ und erzielte eine hohe Vorhersagegenauigkeit für Regenwasserabflüsse vom HCU-Dach. Als einzige Faktoren, die signifikant zur Modellbildung beitrugen, waren die Regenmenge und in geringem Maße die Trockenzeit vor dem entsprechenden Regenereignis (ADWP) ausschlaggebend. Auch bei der Modellbildung durch die Literaturdatenbank war die Regenmenge der einzige Faktor mit einem hohen Gewicht. Weitere Beispiele von linearen Regressionsmodellen zwischen Regen und Abfluss von Dachbegrünungen lieferten ebenfalls sehr hohe Bestimmtheitsmaße von $R^2 = 0,9$ (Principato et al. 2016) bzw. $R^2 = 0,97$ (Nawaz et al. 2015) mit den Regressionsgleichungen:

$$V = -4,10 + 0,71 N$$

(Principato et al. 2016) und

$$V = -2,7927 + 0,8839 N$$

(Nawaz et al. 2015).

Die Anpassungsgüte mit hohem R^2 , ähnlich wie beim Modell der Meta-Analyse und des HCU-Dachs, sprechen für die Methodik. Trotzdem werden solche Verfahren aufgrund der fehlenden Übertragbarkeit bisher nur in Forschungskontexten verwendet.

5.1.3 Regelwerke: Vergleich – Empfehlungen

Zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage:

„Werden die Dachbegrünungen betreffenden Regelwerke den Leistungen zur Klimafolgenanpassung gerecht? Wie könnten diese eventuell zukünftig verändert werden, um sie in Bemessungsverfahren realitätsnah abzubilden?“

Werden insbesondere Ergebnisse aus Kapitel 4 herangezogen. Der Vergleich unterschiedlicher Berechnungsverfahren zeigte, wie groß die Spannbreite der Ergebnisse bei der Berechnung der Reduzierung von Direktabflüssen von begrünten Dachflächen (32 – 89 %) und Unterschiede bei der Dimensionierung von schadlos überflutbaren Flächen nach dem Prinzip der DIN-1986-100 sein können (34 – 100 %). Diese Unterschiede kamen zum Teil auch durch Berechnungsverfahren zustande, die in Nordamerika zur Dimensionierung von dezentralen Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen genutzt werden und anerkannt sind (SCS-Verfahren). Bei nahezu allen vergleichenden Berechnungen wurden die Direktabflüsse und benötigten Rückhalteflächen in dem angenommenen Grundstück durch die Berechnung mit FLL/DWA Abflussbeiwert mit den höchsten Werten belegt. Das deutet einerseits auf eine erhöhte Überflutungssicherheit durch Unterschätzung des Rückhalts von Dachbegrünungen, andererseits auf eine mögliche systematische Überdimensionierung nachgelagerter Entwässerungsanlagen hin.

Grundsätzlich konnten die Abflussbeiwerte nach FLL/DWA im Rahmen dieser Arbeit als nachvollziehbar dargestellt werden. Auch das Regressionsmodell für die HCU-Dachbegrünung liefert, bedingt durch seine Regressionskoeffizienten, im Endeffekt ähnliche Abflussvolumina wie eine Berechnung mittels Abflussbeiwert C_s nach FLL oder Ψ_M nach DWA-M 153 (jeweils 0,5 für Extensivbegrünung mit >6-10 cm bzw. ≤ 10 cm Aufbaudicke). Die Abflussbeiwerte finden in der Praxis aber nur Anwendung bei Berechnungsverfahren mit Starkregen mit geringem Wiederkehrintervall bis 5 Jahre wie z.B. bei der Planung von Versickerungsanlagen (DWA-A 138) oder dem Überflutungsnachweis nach DIN 1986-100. Nach den in dieser Arbeit aufgeführten Nachweisen der Wirksamkeit bei Starkregen mit Wiederkehrintervallen ≥ 5 sind diese Sachverhalte im Sinne einer effektiven Planung zu überdenken. Auch wenn unter-

schiedliche Dachbegrünungen mit unterschiedlichen technischen Aufbauten und klimatisch-ökologischen Vorbedingungen im Endeffekt eine Varianz der Abflussminderung infolge ergiebiger Starkregen aufweisen, sind die wasserwirtschaftlichen Effekte erheblich und nicht nur im kleinen Prozentbereich. Bei Nichtbeachtung dieser Effekte von Dachbegrünungen würde es in den meisten Fällen zu einer Überdimensionierung nachfolgender Anlagen kommen. Welche Berechnungsvariante der Abflusswerte für Dachbegrünungen in dem Sinne die Beste bzw. für die meisten Anlagen Übertragbare ist kann hier nicht abschließend bewertet werden. Dafür bedürfte es Vergleichen einer Vielzahl realer (und modellierter) Beispiele von Dachbegrünungen und Berechnungsverfahren. In der Planungspraxis anerkannt und aufgrund der relativ simplen Handhabbarkeit sind die Abflussbeiwerte, wobei es oft zu Verwirrung aufgrund ungenauer Zuordnungen bzw. unkorrekter Bezeichnungen und Verwechslungen von Spitzenabflussbeiwerten C_s , mittleren Abflussbeiwerten Ψ_M und z.B. Jahresabflussbeiwerten Ψ_A kommt. Abfluss- bzw. Retentionsberechnungen mittels SCS-Verfahren sind im Nordamerikanischen Raum ebenso anerkannt, wie die in dieser Arbeit aus Portland und Philadelphia genutzten Beispiele zeigen.

Weitere die wasserwirtschaftliche Wirksamkeit von Dachbegrünungen beschreibende Effekte wie Spitzenabflussbeiwerte (nicht C_s nach FLL) und die zeitlichen Verzögerungen von Abflussbeginn und Abflussmaximum finden in der Praxis kaum Anwendung. Zumindest in den einfachen, nicht mit hydrologischen Modellen durchgeführten, Berechnungsvorschriften nach DWA spielen diese im Prinzip keine Rolle. Beim Überflutungsnachweis der DIN 1986-100 werden zumindest bei der Berechnung der Abflussmengen eines 2- bzw. 5-jährlichen Regens die sog. Spitzenabflussbeiwerte C_s nach FLL verwendet. Diese sind aber keine Spitzenabflussbeiwerte im Sinne der DIN 4045 (Deutsches Institut für Normung 2016). Dort sind Spitzenabflussbeiwerte Ψ_s definiert als „Quotient aus maximaler Regenabflussspende und zugehöriger maximaler Regenspende“, wobei der Spitzenabflussbeiwert C_s nach FLL als Quotient des Wasserabflusses aus der Dachbegrünung in 15 Minuten und der Regenmenge in 15 Minuten berechnet wird. In Bemessungsvorschriften, die von sehr kurzen Starkregen ausgehen wie die Überflutungsprüfung der DIN 1986-100 (5-15 min.), spielen die teilweise sehr großen Verzögerungszeiten von Dachbegrünungen keine Rolle. Abgesehen vom Beispiel HCU-Dach, wo die Verzögerungszeiten durch den im Verhältnis hohen Anteil direkt entwässernder Flächen die Abflussverzögerungen herabsetzen, sind diese Effekte jedoch auch bei Starkregen kurzer Dauern erheblich. Wie in Tabelle 23 berechnet zeigen zumindest die Literaturdaten noch deutliche Verzögerungen über 1 h. Empfehlenswert wäre zumindest die Würdigung der Rückhaltungswirkung und zeitlichen Verzögerung bzw. Drosselung der Abflüsse von Dachbegrünungen von Retentionsdächern in Berechnungsvorschriften wie des Überflutungsnachweises der DIN 1986-100. Die Funktion kann in dem Fall auch bei Starkregen, die seltener

als einmal in 30 Jahren auftreten, als gesichert gelten. Gerade bei Grundstücken, bei denen Dachflächen einen großen Teil der Gesamtfläche ausmachen, könnte somit ein Großteil an Rückhaltefläche außerhalb der Dachflächen wegfallen.

5.2 Methodenkritik Systematischer Review und Meta-Analyse

Die Methode des Systematischen Reviews führte wie erwartet zu einem großen Umfang an Studien. Die ausführliche Darstellung des Verfahrens mit Schlüsselbegriffen zur Datenbanksuche und den Faktoren, die zur letztendlichen Auswahl oder Nicht-Auswahl von Studien führten, führten zu einer hohen Transparenz und hohem Reproduktionsvermögen. Nicht reproduzierbar ist jedoch die Auswahl der zusätzlichen Anzahl an Studien, die bereits zum Themengebiet vorhanden war. Dabei handelte es sich meist um deutschsprachige Artikel aus Fachzeitschriften und Forschungsberichte, welche anhand der englischsprachigen Datenbanksuche nicht in die Literaturdatenbank übernommen worden wäre, diese waren folgende: Kaufmann (2000), Knoll (2000), Kolb (1987, 1999, 2002, 2003), Liesecke (1989, 1993, 1999, 2002), Mann et al. (2000), Palmariciotti (2015), Schade (2000), Schmidt & Teschner (2000), Sieker et al. (2019) und Winkler (2017). Das bedingt letztendlich einen „systematischen Fehler“, der jedoch letztendlich auch durch die Auflistung aller in die Datenbank übernommener Literaturquellen in Anhang 7.1 dargestellt wurde.

Allgemein ist die Aufstellung konkreter Merkmale und Bedingungen, welche dazu führen, dass Studien in eine Analyse mitaufgenommen werden und welche nicht, vom Urteil der jeweiligen Forscher abhängig und somit eine Quelle unterschiedlicher Endresultate (Stamm und Schwarb 1995). In diesem Fall wurden die Bedingungen anhand der Zielsetzung formuliert, nämlich der quantitativen Analyse von Einflussfaktoren zu Klimafolgenanpassungsleistungen von Dachbegrünungen, und sollten diesbezüglich kaum Entscheidungsspielräume in der Studienauswahl bedingen. Die Begrenzung der Literatursuche auf nur zwei englischsprachige Datenbanken hat auch zur Folge, dass sicherlich einige Studien, die nicht in den Datenbanken gelisteten Fachzeitschriften erschienen sind, nicht in die Analyse aufgenommen wurden.

Die erfolgte Meta-Analyse, also die quantitative Auswertung der Datenbank, lieferte nur begrenzt stichhaltige bzw. signifikante Ergebnisse zu Umweltfaktoren, welche die Klimafolgenanpassungsleistung von Dachbegrünungen betreffen. Es konnten teilweise qualitative Aussagen aus Studien bestätigt werden, wie bspw. der sinkende Regenwasserrückhalt auf Dachbegrünungen mit steigender Regenmenge.

Insgesamt besteht aber der Eindruck, dass nur wenige konkret belegbare quantitative Aussagen getroffen werden konnten. Dieser Effekt kann zum Teil mit der Stichprobe bzw. den Datenpunkten erklärt werden, welche zur Analyse herangezogen wurden. Durch den Vergleich einer Vielzahl unterschiedlicher Dächer mit unterschiedlichen technischen Komponenten und klimatisch-ökologischen Voraussetzungen können keine mit „Laborwerten“ vergleichbaren Aussagen erwartet werden. Einige qualitative Tendenzen konnten jedoch eindeutig zugeordnet werden und können hilfreich für zukünftige Planungsansätze sein. Weitere Unsicherheiten in der statistischen Auswertung der Literaturliteraturdatenbank sind auf die Qualitätsstandards der Eingangsdaten zurückzuführen. Es ist zu erwarten, dass die Anforderungen an die Untersuchungen und die Datenaufbereitung- und -Veröffentlichung teilweise unterschiedlich sind. Das kann zu systematischen Fehlern in der Weiterverarbeitung der Daten führen, die allerdings nicht genau quantifizierbar sind.

5.3 Ausblick und Forschungsbedarf

Trotz der bereits erfolgten Messzeiträume sind längere Zeitreihen erforderlich, um die Beeinflussung verschiedenster Umwelteinflüsse auf das Abflussgeschehen unterschiedlicher Regen letztendlich qualifiziert zu beurteilen. Zusätzlich bedarf es weiter Untersuchungen bezüglich des zeitlichen Verlaufs (Intensität) von bestimmten Regenereignissen an unterschiedlichen Dachtypen, um die Wirkungen, die über die reine Speicherung und Verzögerung im Substrat hinausgehen, zu identifizieren. Zumindest auf dem untersuchten Dach der HCU scheint es weitere Effekte wie temporärer Rückstau/Speicherung auf der Oberfläche zu geben, die bisher noch nicht beschrieben wurden. Solche Effekte scheinen bisher noch nicht an realen großformatigen Dächern beschrieben worden zu sein und müssten anhand von z.B. Film- oder Fotoaufnahmen im Starkregenfall dokumentiert werden. Die Entwicklung der Retentionsleistung mit zunehmendem Alter von Dachbegrünungen sollten außerdem tiefer beforscht werden, um mehr Information über Alterungsprozesse und deren Auswirkungen auf die hydrologische Dynamik zu sammeln, dazu bedürfte es auch Untersuchungen zur Veränderung des Substrats z.B. hinsichtlich Akkumulierung organischer Substanz. Solche Alterungsdynamiken scheinen derzeit noch eine der größten Unbekannten in der Forschung zu Dachbegrünungen zu sein (Andenæs et al. 2018). Am Dach der HCU wäre es außerdem sinnvoll, weitere Messreihen aufzunehmen, welche nicht durch den Direktabfluss von unbegrünerten Dachteilen „verunreinigt“ werden, um die Wirkung dieses Effekts auf die wasserwirtschaftliche Wirksamkeit des Daches zu bewerten.

Speziell für Retentionsdachbegrünungen sollte eine genauere Beschreibung des Wasserhaushalts angestrebt werden. Zumindest bei „statischen“ Drosseln mit Daueranstau wäre die Dynamik der Wasserstände interessant. Somit könnten Rückschlüsse auf die Verdunstungsleistung gezogen werden und

dementsprechend Entleerungszeiten vorhergesagt werden. Hinsichtlich der Vorhaltung von Speicherräumen für außergewöhnliche Starkregen bestehen noch einige Unsicherheiten diesbezüglich, die auch im Sinne der Integration in Regelwerke geklärt werden müssten. Die Verdunstungsleistung ist jedoch erheblich von der Vegetationsentwicklung und -zusammensetzung abhängig. Das stadtklimatische Potenzial bzw. Potenzial zur Abkühlung der Umgebung scheint bei Retentionsdachbegrünungen aufgrund der tendenziell besseren Wasserversorgung erheblich höher zu sein als bei konventionellen Extensivbegrünungen.

Zur Kühlung der Umgebung von z.B. Fußgängern in urbanen Gebieten eignen sich außerdem eine Vielzahl weiterer Maßnahmen, die teilweise auch grünen Infrastrukturen zuzuordnen sind. Grundsätzlich scheinen Maßnahmen, die sich in der unmittelbaren Umgebung befinden und wirken, einen höheren Abkühlungseffekt zu haben als Maßnahmen auf Dächern wie bspw. Gründächer oder sog. white roofs (Taleghani et al. 2016). Bäume und Fassadenbegrünungen haben im Vergleich zu Dachbegrünungen unter gleichen Bedingungen meist größere Kühleffekte in Straßenräumen (Francis und Jensen 2017; Zölch et al. 2016). Als zusätzliche Maßnahme zu bodengebundenen grünen Infrastrukturen sind Dachbegrünungen zumindest nicht als Konkurrenz zu sehen. Ein Vorteil heller Oberflächen gegenüber Gründächern ist der geringe Albedo, welcher dazu führt, dass während der Tageszeit weniger Wärme gespeichert wird (Taleghani et al. 2016). Durch die Verdunstung von Pflanzenoberflächen kann dies jedoch z.T. kompensiert werden. Die Kühleffekte von white roofs und Dachbegrünungen können in etwa das gleiche Ausmaß annehmen, die einfachere Unterhaltung von hellen Dächern kann dazu führen, dass diese Maßnahme in der Praxis bevorzugt wird (Makido et al. 2019; Žuvela-Aloise et al. 2018).

Die Vielzahl an Ökosystemleistungen von Dachbegrünungen (Regenwasserrückhalt, Luftfilterung, Lärminderung, Biodiversität,...) sollte in der Planung jedoch mit einbezogen werden (Francis und Jensen 2017; Makido et al. 2019). Generell sollte beachtet werden, dass eine Erhöhung des städtischen Grünanteils mit einer Erhöhung des Abkühlungspotenzials einhergeht (Ng et al. 2012; Sieker et al. 2019; Sodoudi et al. 2014). Anhand der in dieser Arbeit nur bedingt nachgewiesenen Einflüsse auf die Abkühlungsleistung von Dachbegrünungen ist es kaum möglich, systematische Empfehlungen für Planungsinstrumente zu geben, die auf die Reduzierung des UHI-Effekts abzielen. Vielmehr ist darauf hinzuweisen, dass die Abkühlungsleistung erheblich von äußeren Faktoren beeinflusst wird und nur mithilfe von projektbezogenen kleinräumigen Untersuchungen z.B. mittels mikroskaliger Modelle oder vergleichender Messungen versucht werden kann, zumindest Potenziale abzuschätzen. Ob dieses Abkühlungspotenzial ausgeschöpft werden kann, hängt dann nicht unerheblich von der Entwicklung der Pflanzen und deren Wasserversorgung ab.

Im Rahmen der hier durchgeführten statistischen Analyse konnten, durch die fehlende standardisierte Methodik zur Erfassung der mikroklimatischen Effekte in den einzelnen Studien, kaum Aussagen bezüglich der die klimatische Wirkung beeinflussender Faktoren getroffen werden. Es herrschen u.a. verschiedene Längen und Zeitpunkte der Messreihen, klimatische und witterungsbedingte Unterschiede und teilweise schwer vergleichbare räumliche Skalen vor. Was den Vergleich, im Gegensatz zu den Studien zur Regenwasserbewirtschaftung mit Dachbegrünungen, zusätzlich erschwert, sind die oft unzureichend beschriebenen Charakteristiken der Dachbegrünungen bezüglich technischer Ausführungen. Die außerdem aus der geringeren Anzahl von Studien resultierende relativ geringe Anzahl von Datenpunkten erschwerte die systematische Aufarbeitung in einem vergleichbaren Rahmen wie bei Studien zur Regenwasserbewirtschaftung. Eine Standardisierung solcher Studien bezüglich der Methodik und Ziele würde eine zukünftige vergleichende Bewertung erleichtern bzw. ermöglichen. Sowohl für die Quantifizierung stadtklimatischer als auch hydrologischer Effekte von Dachbegrünungen und deren Zusammenspiel mit weiteren grünen Infrastrukturen sind Messungen an realen Beispielen und Modellierungen auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen von Nöten. So können in dieser Arbeit vereinzelt spezifizierte Aussagen generalisiert und auf größere räumliche Ebenen übertragen werden.

6. Literatur

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung: Mit 103 Tabellen und 31 Listen, 5th edn. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart.
- Ahiablame LM, Engel BA, Chaubey I (2012) Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research. *Water Air and Soil Pollution* 223: 4253–4273. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1189-2>
- Akther M, He J, Chu A, Huang J, van Duin B (2018) A Review of Green Roof Applications for Managing Urban Stormwater in Different Climatic Zones. *Sustainability* 10: 2864. <https://doi.org/10.3390/su10082864>
- Alexandri E, Jones P (2008) Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment* 43: 480–493. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.055>
- Andenæs E, Kvande T, Muthanna T, Lohne J (2018) Performance of Blue-Green Roofs in Cold Climates: A Scoping Review. *Buildings* 8: 55. <https://doi.org/10.3390/buildings8040055>
- Andres-Domenech I, Perales-Momparler S, Morales-Torres A, Escuder-Bueno I (2018) Hydrological Performance of Green Roofs at Building and City Scales under Mediterranean Conditions. *Sustainability* 10. <https://doi.org/10.3390/su10093105>
- Arnbjerg-Nielsen K, Willems P, Olsson J, Beecham S, Pathirana A, Bülow Gregersen I, Madsen H, Nguyen V-T-V (2013) Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: a review. *Water Science and Technology* 68: 16–28. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.251>
- Arnfield AJ (2003) Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology* 23: 1–26.
- Baccini M, Kosatsky T, Analitis A, Anderson HR, D'Ovidio M, Menne B (2011) Impact of heat on mortality in 15 European cities: attributable deaths under different weather scenarios. *Journal of Epidemiology & Community Health*: 64–70.

- Ballard WB, Wilson S, Udale-Clarke H, Illman S, Scott T, Ashley R, Kellagher R (2015) The SuDS Manual. C753. CIRIA, London.
- Bass, B., Krayenhoff, S., Martilli, A. (2002) Mitigating the urban heat island with green roof infrastructure. Urban Heat Island Summit, Toronto.
- Beecham S, Razzaghamanesh M, Bustami R, Ward J (2019) The Role of Green Roofs and Living Walls as WSUD Approaches in a Dry Climate. In: Sharma AK, Gardner T, Begbie D (eds) Approaches to Water Sensitive Urban Design: Potential, Design, Ecological Health, Urban Greening, Economics, Policies, and Community Perceptions, pp 409–430.
- Bengtsson L (2005) Peak flows from thin sedum-moss roof. *Nordic Hydrology* 36: 269-280.
- Bengtsson L, Grahn L, Olsson J (2005) Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. *Nordic Hydrology* 36: 259–268.
- Berardi U (2016) The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.021>
- Berardi U, Ghaffarian Hoseini A (2014) State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy* 115: 411–428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- Berndtsson JC (2010) Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering* 36: 351-360.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
- Besir AB, Cuce E (2018) Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 915–939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- Burszta-Adamiak E, Stanczyk J, Lomotowski J (2019) Hydrological performance of green roofs in the context of the meteorological factors during the 5-year monitoring period. *Water and Environment Journal* 33: 144–154. <https://doi.org/10.1111/wej.12385>
- Cameron RWF, Taylor JE, Emmett MR (2014) What's 'cool' in the world of green facades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment* 73: 198–207.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.005>

- Carson T, Keeley M, Marasco DE, McGillis W, Culligan P (2017) Assessing methods for predicting green roof rainfall capture: A comparison between full-scale observations and four hydrologic models. *Urban Water Journal* 14: 589–603. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1056742>
- Carson TB, Marasco DE, Culligan PJ, McGillis WR (2013) Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: observations and multi-year modeling of three full-scale systems. *Environmental Research Letters* 8: 24 - 36. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024036>
- Carter TL, Rasmussen TC (2006) Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association* 42: 1261-1274.
- Cascone S, Coma J, Gagliano A, Perez G (2019) The evapotranspiration process in green roofs: A review. *Building and Environment* 147: 337–355. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.024>
- Chapman S, Watson JEM, Salazar A, Thatcher M, McAlpine CA (2017) The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecology* 32: 1921–1935. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4>
- Cook-Patton SC, Bauerle TL (2012) Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: A literature review. *Journal of Environmental Management* 106: 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.003>
- Currie BA, Bass B (2008) Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems* 11: 409–422. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0054-y>
- Demuzere M, Orru K, Heidrich O, Olazabal E, Geneletti D, Orru H, Bhave AG, Mittal N, Feliu E, Faehnle M (2014) Mitigating and adapting to climate change: multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management* 146: 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.025>
- Deutscher Wetterdienst; Institut für Technisch-Wissenschaftliche Hydrologie (2016) KOSTRA-DWD 2010: Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertung / eine Software des Instituts für Technisch-Wissenschaftliche Hydrologie, 3rd edn. ITWH, Offenbach.
- Deutsches Institut für Normung (2001) Dachentwässerung: Planung und Bemessung ; deutsche Fassung ; DIN EN 12056-3:2001-01, 2001st edn. Deutsche Norm, DIN EN 12056-3. Beuth, Berlin.

Deutsches Institut für Normung (2016a): Gebäude- und Grundstücksentwässerung. Planung und Ausführung ; DIN 1986-100 und DIN EN 12056-4. September 2016. Berlin (Deutsche Norm, DIN 1986-100).

Deutsches Institut für Normung (2016b): Abwassertechnik. Grundbegriffe = Wastewater engineering : Vocabulary. November 2016. Berlin (Deutsche Norm, DIN 4045).

Drinkmann A (1990) Methodenkritische Untersuchungen zur Metaanalyse. Dt. Studien-Verl., Weinheim.

Dunnett N, Nagase A, Booth R, Grime P (2008a) Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. Urban Ecosystems 11: 385–398.

<https://doi.org/10.1007/s11252-008-0064-9>

Dunnett N, Nagase A, Hallam A (2008b) The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons 2001–2006: influence of substrate depth. Urban Ecosystems 11:

373–384. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0042-7>

DWA (2005) Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser, 2005th edn. DWA-Regelwerk, A 138. DWA, Hennef.

DWA (2007) Merkblatt DWA-M 153 Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser, 2007th edn. DWA-Regelwerk, vol 153. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.

DWA (2013) Bemessung von Regenrückhalteräumen, 2013rd edn. DWA-Regelwerk, A 117. DWA, Hennef.

DWA (2020) Arbeitsblatt DWA-A 138-1 Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser - Teil 1: Planung, Bau, Betrieb (Entwurf). DWA-Arbeitsblatt, 138-1. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.

Eisend M (2009) Metaanalyse. In: Baumgarth C, Eisend M, Evanschitzky H (eds) Empirische Master-techniken. Gabler Verlag.

Fang CF (2008) Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops. Energy and Buildings 40: 1048–1052. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.06.007>

- Fang CF (2010) Rainwater retention capacity of green roofs in subtropical monsoonal climatic regions: A case study of Taiwan. WIT Transactions on Ecology and the Environment Conference 5th International Conference on Comparing Design in Nature with Science and Engineering, Design and Nature 2010. Pisa, The International Journal of Design and Nature and Ecodynamics, 138: 239–249. <https://doi.org/10.2495/DN100211>
- Farrell C, Ang XQ, Rayner JP (2013) Water-retention additives increase plant available water in green roof substrates. Ecological Engineering 52: 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.098>
- Fassman E, Simcock R (2012) Moisture Measurements as Performance Criteria for Extensive Living Roof Substrates. Journal of Environmental Engineering 138: 841–851. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000532](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000532)
- Fassman-Beck E, Voyde E, Simcock R, Hong YS (2013) 4 Living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation? Journal of Hydrology 490: 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.004>
- Fioretti R, Palla A, Lanza LG, Principi P (2010) Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. Building and Environment 45: 1890–1904. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.03.001>
- Francis LFM, Jensen MB (2017) Benefits of green roofs: A systematic review of the evidence for three ecosystem services. Urban Forestry & Urban Greening 28: 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.10.015>
- Gedge D, Kadas G (2005) Green roofs and biodiversity. Biologist 52: 161–169.
- Geiger W (2009) Neue Wege für das Regenwasser, 1st edn. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, s.l.
- Getter KL, Rowe DB, Andresen JA (2007) Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. Ecological Engineering 31: 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004>
- Glass GV (1976) Primary, Secondary, and Meta-Analysis of Research. Educational Researcher 5: 3–8. <https://doi.org/10.2307/1174772>

- Graceson A, Hare M, Monaghan J, Hall N (2013) The water retention capabilities of growing media for green roofs. *Ecological Engineering* 61: 328–334. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.030>
- Gregoire BG, Clausen JC (2011) Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering* 37: 963–969. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.004>
- Gutknecht D (1978) Methoden der hydrologischen Kurzfristvorhersage. Wiener Mitteilungen, vol 26. Techn. Univ. Wien Inst. für Hydraulik Gewässerkunde u. Wasserwirtschaft, Wien.
- Haaland C, van den Bosch CK (2015) Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: A review. *Urban Forestry & Urban Greening* 14: 760–771. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.07.009>
- Hajad S, Kosatky T (2009) Heat-related mortality: a review and exploration of heterogeneity. *Journal of Epidemiology & Community Health*: 753–760
- Hakimdavar R, Culligan PJ, Finazzi M, Barontini S, Ranzi R (2014) Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. *Ecological Engineering* 73: 494–508. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.080>
- Hamdi R, Schayes G (2008) Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. *International Journal of Climatology* 28: 973–982.
- Harazono Y, Teraoka S, Nakase I, Ikeda H (1991) Effects of Rooftop Vegetation using Artificial Substrates on the Urban Climate and the Thermal Load of Buildings. *Energy and Buildings* 15 - 16: 435–442.
- Harper GE, Limmer MA, Showalter WE, Burken JG (2015) Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA. *Ecological Engineering* 78: 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.004>
- Hathaway, A.M., Hunt, W.F., Jennings, J.D. (2008) A field study of green roof hydrologic and water quality performance. *Transactions of the ASABE* 51: 37–44.

- Herrera J, Flamant G, Gironás J, Vera S, Bonilla CA, Bustamante W, Suárez F (2018) Using a Hydrological Model to Simulate the Performance and Estimate the Runoff Coefficient of Green Roofs in Semiarid Climates. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w10020198>
- Heusinger J, Weber S (2015) Comparative microclimate and dewfall measurements at an urban green roof versus bitumen roof. *Building and Environment* 92: 713–723. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.002>
- Heusinger J, Sailor DJ, Weber S (2018) Modeling the reduction of urban excess heat by green roofs with respect to different irrigation scenarios. *Building and Environment* 131: 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.003>
- Hill J, Drake J, Sleep B, Margolis L (2017) Influences of Four Extensive Green Roof Design Variables on Stormwater Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*
- Hoelscher M-T, Nehls T, Jänicke B, Wessolek G (2016) Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings* 114: 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>
- Hu S, Liu L, Cao J, Chen N, Wang Z (2019) Water Resilience by Centipedegrass Green Roof: A Case Study. *Buildings* 9. <https://doi.org/10.3390/buildings9060141>
- Jim CY (2012) Effect of vegetation biomass structure on thermal performance of tropical green roof. *LANDSCAPE AND ECOLOGICAL ENGINEERING* 8: 173–187. <https://doi.org/10.1007/s11355-011-0161-4>
- Jim CY (2015) Assessing climate-adaptation effect of extensive tropical green roofs in cities. *Landscape and Urban Planning* 138: 54–70. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.014>
- Joo J, Lee J, Kim J, Jun H, Jo D (2014) Inter-Event Time Definition Setting Procedure for Urban Drainage Systems. *Water* 6: 45–58. <https://doi.org/10.3390/w6010045>
- Kabisch N, Bonn A, Korn H, Stadler J (2017) Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas: Linkages between Science, Policy and Practice. *Theory and Practice of Urban Sustainability*. Springer, Cham.
- Kasmin H, Musa S (2012) Green Roof As a Potential Sustainable Structure For Runoff Reduction. *IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA 2012)*: 889 – 893.

- Katsoulas N, Antoniadis D, Tsirogiannis IL, Labraki E, Bartzanas T, Kittas C (2017) Microclimatic effects of planted hydroponic structures in urban environment: measurements and simulations. *International Journal of Biometeorology* 61: 943–956. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1274-0>
- Knoll S (2000) Das Abflußverhalten von extensiven Dachbegrünungen. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Köhler M, Poll PH (2010) Long-term performance of selected old Berlin greenroofs in comparison to younger extensive greenroofs in Berlin. *Ecological Engineering* 36: 722–729. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.019>
- Köhler M, Schmidt M, Laar M (2003) Green roofs as a contribution to reduce urban heat islands. In: RIO 3 - World Climate & Energy Event.
- Kolb W (1987) Abflussverhältniss extensiv begrünter Flachdächer: 1. Abflußspenden und Wasserrückhaltung im Vergleich mit Kiesdächern. *Zeitschrift für Vegetationstechnik* 10: 111–116.
- Kolokotsa D, Santamouris M, Zerefos SC (2013) Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. *Solar Energy* 95: 118–130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.001>
- Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F (2006) World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15: 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Kouhanestani ZK, Dehdari S, Jafarizadeh M (2018) Performance evaluation of green roofs in urban runoff reduction. *International Journal of Human Capital in Urban Management*. <https://doi.org/10.22034/ijhcum.2018.03.01.007>
- Kurtz T (2008) Flow Monitoring of Three Ecoroofs in Portland, Oregon. In: She N, Char M (eds) *International Low Impact Development Conference 2008*, 85–98.
- Lee JY, Moon HJ, Kim TI, Kim HW, Han MY (2013) Quantitative analysis on the urban flood mitigation effect by the extensive green roof system. *Environmental Pollution* 181: 257–261. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.039>

- Li D, Bou-Zeid E (2013) Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52: 2051–2064. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-02.1>
- Li D, Bou-Zeid E, Oppenheimer M (2014) The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters* 9: 1-16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055002>
- Lozán JL, Graßl H, Jendritzky G, Karbe L, Reise K (2008) Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken ; Gefahren für Menschen, Tiere und Pflanzen ; wissenschaftliche Fakten ; mit 37 Tabellen und 7 Tafeln. <http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/gefahren-fur-pflanzentiere/>
- MacIvor JS, Lundholm J (2011) Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering* 37: 407–417. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.10.004>
- Mackey CW, Lee X, Smith RB (2012) Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island. *Building and Environment* 49: 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.004>
- Makido Y, Hellman D, Shandas V (2019) Nature-Based Designs to Mitigate Urban Heat: The Efficacy of Green Infrastructure Treatments in Portland, Oregon. *Atmosphere* 10: 282. <https://doi.org/10.3390/atmos10050282>
- Maniak U (2010) *Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure*, 6th edn. Springer, Berlin, Heidelberg.
- McGranahan G, Balk D, Anderson B (2007) The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization* 19: 17–37. <https://doi.org/10.1177/0956247807076960>
- Mentens J, Raes D, Hermy M (2006) Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* 77: 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
- Mickovski SB, Buss K, McKenzie BM, Sökmener B (2013) Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs. *Ecological Engineering* 61: 706–714. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.015>

- Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG (2009) Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS Med* 6:e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Morgan S, Celik S, Retzlaff W (2013) Green roof storm-water runoff quantity and quality. *Journal of Environmental Engineering (United States)* 139: 471 - 478. <https://doi.org/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0000589>
- Müller N, Kuttler W, Barlag A-B (2014) Counteracting urban climate change: adaptation measures and their effect on thermal comfort. *Theor Appl Climatol* 115: 243–257. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0890-4>
- Murphy D, Morgan S, Celik S, Retzlaff B (2018) Evaluation of a residential green roof system for stormwater runoff retention. *Journal of Living Architecture* 5: 16–30.
- Nagase A, Dunnett N (2012) Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning* 104: 356 – 363. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.11.001>
- Nardini A, Andri S, Crasso M (2012) Influence of substrate depth and vegetation type on temperature and water runoff mitigation by extensive green roofs: shrubs versus herbaceous plants. *Urban Ecosystems* 15: 697–708. <https://doi.org/10.1007/s11252-011-0220-5>
- Nawaz R, McDonald A, Postoyko S (2015) Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate. *Ecological Engineering* 82: 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.061>
- Ng E, Chen L, Wang Y, Yuan C (2012) A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment* 47: 256–271. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.014>
- Oke TR (1973) City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7: 769–779.
- Oke TR (1982) The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108: 1–24.

- Oudin Åström D, Forsberg B, Ebi KL, Rocklöv J (2013) Attributing mortality from extreme temperatures to climate change in Stockholm, Sweden. *Nature Climate Change* 3: 1050–1054.
<https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2022>
- Ouldboukhitine S-E, Belarbi R, Djedjig R (2012) Characterization of green roof components: Measurements of thermal and hydrological properties. *Building and Environment* 56: 78–85.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.024>
- Pachauri RK, Mayer L, IPCC SYR TSU (eds) (2015) *Climate change 2014: Synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- Palermo SA, Turco M, Principato F, Piro P (2019) Hydrological Effectiveness of an Extensive Green Roof in Mediterranean Climate. *Water* 11. <https://doi.org/10.3390/w11071378>
- Palla A, Sansalone JJ, Gnecco I, Lanza LG (2011) Storm water infiltration in a monitored green roof for hydrologic restoration. *Water Science and Technology* 64: 766–773.
<https://doi.org/10.2166/wst.2011.171>
- Peng L, Jim C (2013) Green-Roof Effects on Neighborhood Microclimate and Human Thermal Sensation. *Energies* 6: 598–618. <https://doi.org/10.3390/en6020598>
- Peng L, Jim C (2015) Seasonal and Diurnal Thermal Performance of a Subtropical Extensive Green Roof: The Impacts of Background Weather Parameters. *Sustainability* 7: 11098–11113.
<https://doi.org/10.3390/su70811098>
- Poë S, Stovin V, Berretta C (2015) Parameters influencing the regeneration of a green roof's retention capacity via evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 523: 356–367.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.002>
- Pullin AS, Stewart GB (2006) Guidelines for systematic review in conservation and environmental management. *Conservation Biology* 20: 1647–1656.
- Razzaghmanesh M, Beecham S (2014) The hydrological behaviour of extensive and intensive green roofs in a dry climate. *Science of the Total Environment* 499: 284–296.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.046>

- Richter M, Deppisch S, Storch HV (2013) Observed Changes in Long-Term Climatic Conditions and Inner-Regional Differences in Urban Regions of the Baltic Sea Coast. *Atmospheric and Climate Sciences* 03: 165–176. <https://doi.org/10.4236/acs.2013.32018>
- Richter M (2015) Urban climate change-related effects on extreme heat events in Rostock, Germany. *Urban Ecosystems* 19: 849 - 866. <https://doi.org/10.1007/s11252-015-0508-y>
- Richter M, Dickhaut W (2016) Evaluation of green roof hydrologic performance for rainwater run-off management in Hamburg. In: Karlsruhe Institute Of Technology, ZEBAU-Centre For Energy, Construction Architecture and the Environment GmbH, Hamburg (eds) Sustainable Built Environment Conference 2016 in Hamburg : Strategies, Stakeholders, Success factors, 7th - 11th March 2016 ; Conference Proceedings. Karlsruhe, 536–545.
- Richter M, Dickhaut W (2019): RISA-Pilotprojekt zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung mit Dachbegrünungen in Hamburg. *GebäudeGrün* 2: 10–14.
- Richter, M, Dickhaut W (2021, im Druck): Langzeituntersuchungen von Retentionsgründächern in Hamburg. In *GebäudeGrün* 3.
- Ripley EA, Archibold OW, Bretell DL (1996) Temporal and spatial temperature patterns in Saskatoon. *Weather* 51: 398–403.
- Rocklöv J, Forsberg B (2009) Comparing approaches for studying the effects of climate extremes - a case study of hospital admissions in Sweden during an extremely warm summer. *Global Health Action*.
- Rowe D, Monterusso M, Rugh C (2006) Assessment of Heat-expanded Slate and Fertility Requirements in Green Roof Substrates. *Horticultural Technology* 16. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.16.3.0471>
- Sahnoune S, Benhassine N (2017) Quantifying the Impact of Green-Roofs on Urban Heat Island Mitigation. *IJESD* 8: 116–123. <https://doi.org/10.18178/ijesd.2017.8.2.932>
- Santamouris M (2014) Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy* 103: 682–703.

- Scherber K, Langner M, Endlicher W (2013) Spatial analysis of hospital admissions for respiratory diseases during summer months in Berlin taking bioclimatic and socio-economic aspects into account. *Die Erde - Journal of the Geographical Society of Berlin* 144: 217–237.
- Scherer D, Fehrenbach U, Lakes T, Lauf S, Meier F, Schuster C (2013) Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany. *Die Erde - Journal of the Geographical Society of Berlin* 144: 238–259.
- Semadeni-Davies A, Hernebring C, Svensson G, Gustafsson LG (2008) The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system. *Journal of Hydrology*: 100–113.
- Sherrard, Jr., James A., Jacobs JM (2012) Vegetated Roof Water-Balance Model: Experimental and Model Results. *Journal of Hydrologic Engineering* 17: 858–868.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000531](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000531)
- Schweizer Ingenieur- und Architektenverein (SIA) (2013) Begrünung von Dächern: Schweizer Norm SN 564312. SIA, vol 312. SIA, Zürich.
- Simmons MT, Gardiner B, Windhager S, Tinsley J (2008) Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems* 11: 339–348.
<https://doi.org/10.1007/s11252-008-0069-4>
- Skala V, Dohnal M, Votrubova J, Jelinkova V (2019) The use of simple hydrological models to assess outflow of two green roofs systems. *Soil and Water Research* 14: 94–103.
<https://doi.org/10.17221/138/2018-SWR>
- Sobczyk M, Mrowiec M (2016) Retention capacity of extensive green roofs. *Journal of Water and Land Development* 30: 113–117. <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0027>
- Sodoudi S, Shahmohamadi P, Vollack K, Cubasch U, Che-Ani AI (2014) Mitigating the Urban Heat Island Effect in Megacity Tehran. *Advances in Meteorology* 2014: 1–19.
<https://doi.org/10.1155/2014/547974>
- Soulis KX, Valiantzas JD, Ntoulas N, Kargas G, Nektarios PA (2017) Simulation of green roof runoff under different substrate depths and vegetation covers by coupling a simple conceptual and a

- physically based hydrological model. *Journal of Environmental Management* 200: 434–445.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.012>
- Speak AF, Rothwell JJ, Lindley SJ, Smith CL (2012) Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. *Atmospheric Environment* 61: 283–293.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.043>
- Speak AF, Rothwell JJ, Lindley SJ, Smith CL (2013a) Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. *Science of the Total Environment* 461-462: 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.085>
- Speak AF, Rothwell JJ, Lindley SJ, Smith CL (2013b) Reduction of the urban cooling effects of an intensive green roof due to vegetation damage. *Urban Climate* 3: 40–55.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.01.001>
- Spolek G (2008) Performance monitoring of three ecoroofs in Portland, Oregon. *Urban Ecosystems* 11: 349–359. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0061-z>
- Stamm H, Schwarb TM (1995) Metaanalyse. Eine Einführung. *German Journal of Human Resource Management* 9: 5–27. <https://doi.org/10.1177/239700229500900101>
- Steinecke K (1999) Urban climatological studies in the Reykjavik subarctic environment, Iceland. *Atmospheric Environment* 33: 4157 - 4162
- Steusloff S (1998) Input and Output of Airborne Aggressive Substances on Green Roofs in Karlsruhe. In: Breuste J, Feldmann H, Uhlmann O (eds) *Urban Ecology*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 144–148.
- Storch HV, Stehr N (2007) Anpassung an den Klimawandel. *Aus Politik und Zeitgeschichte : APuZ*
- Stovin V, Vesuviano G, Kasmin H (2012) The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology* 414-415: 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022>
- Stovin V, Poë S, De-Ville S, Berretta C (2015) The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance. *Ecological Engineering* 85: 159–172.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.076>

- Sun T, Grimmond CSB, Ni G-H (2016) How do green roofs mitigate urban thermal stress under heat waves? *J. Geophys. Res. Atmos.* 121: 5320–5335. <https://doi.org/10.1002/2016JD024873>
- Susca T (2019) Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate. *Building and Environment* 162: 106273. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106273>
- Suter I, Maksimović Č, van Reeuwijk M (2017) A neighbourhood-scale estimate for the cooling potential of green roofs. *Urban Climate* 20: 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.007>
- Svensson MK (2002) *Urban Climate in Relation to Land Use, Planning and Comfort*. Doctoral Thesis, Göteborg University.
- Svensson MK, Thorsson S, Lindqvist S (2003) A geographical information system model for creating bioclimatic maps: Examples from a high, mid-latitude city. *International Journal of Biometeorology* 47: 102–112.
- Takebayashi H, Moriyama M (2007) Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment* 42: 2971–2979. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.017>
- Taleghani M, Sailor D, Ban-Weiss GA (2016) Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a Los Angeles neighborhood. *Environmental Research Letters* 11: 24003
- Theeuwes NE, Steeneveld G-J, Ronda RJ, Holtslag AAM (2017) A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe. *International Journal of Climatology* 37: 443–454. <https://doi.org/10.1002/joc.4717>
- Thorsson S, Lindberg F, Björklund J, Holmer B, Rayner D (2011) Potential changes in outdoor thermal comfort conditions in Gothenburg, Sweden due to climate change: the influence of urban geometry. *International Journal of Climatology* 31: 324–335
- van Renterghem T (2018) Improving the noise reduction by green roofs due to solar panels and substrate shaping. *Building Acoustics* 25: 219–232. <https://doi.org/10.1177/1351010X18776804>
- van Seters T, Rocha L, Smith D, MacMillan G (2009) Evaluation of green roofs for runoff retention, runoff quality, and leachability. *Water Quality Research Journal of Canada* 44: 33–47.

- van Woert ND, Rowe DB, Andresen JA, Rugh CL, Fernandez RT, Xiao L (2005) Green Roof Stormwater Retention. *Journal of Environment Quality* 34: 1036. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0364>
- Villarreal EL, Bengtsson L (2005) Response of a Sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering* 25: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.11.008>
- Voyde E, Fassman E, Simcock R (2010) Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *Journal of Hydrology* 394: 384–395. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.013>
- Weart SR (2008) *The discovery of global warming. New histories of science, technology, and medicine.* Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Westgate MJ, Lindenmayer DB (2017) The difficulties of systematic reviews. *Conservation Biology* 31: 1002–1007. <https://doi.org/10.1111/cobi.12890>
- Wong NH, Chen Y, Chui, L.O., Sia, A. (2003) Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment* 38: 261–270.
- Yang J, Yu Q, Gong P (2008) Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment* 42: 7266–7273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.003>
- Yang W-Y, Li D, Sun T, Ni G-H (2015) Saturation-excess and infiltration-excess runoff on green roofs. *Ecological Engineering* 74: 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.10.023>
- Yio MHN, Stovin V, Werdin J, Vesuviano G (2013) Experimental analysis of green roof substrate detention characteristics. *Water Science and Technology* 68: 1477-1486. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.381>
- Zhang G, He B-J, Zhu Z, Dewancker BJ (2019) Impact of Morphological Characteristics of Green Roofs on Pedestrian Cooling in Subtropical Climates. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16. <https://doi.org/10.3390/ijerph16020179>
- Zölch T, Maderspacher J, Wamsler C, Pauleit S (2016) Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. *Urban Forestry & Urban Greening* 20: 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.09.011>

Žuvela-Aloise M, Andre K, Schwaiger H, Bird DN, Gallaun H (2018) Modelling reduction of urban heat load in Vienna by modifying surface properties of roofs. *Theoretical and Applied Climatology* 131: 1005–1018. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2024-2>

7. Anhang

7.1 Literaturliste Quantifizierung der Klimafolgenanpassungsleitungen

- Abualfaraj N, Cataldo J, Elboroloy Y, Fagan D, Woerdeman S, Carson T, Montalto FA (2018) Monitoring and Modeling the Long-Term Rainfall-Runoff Response of the Jacob K. Javits Center Green Roof. *Water* 10. <https://doi.org/10.3390/w10111494>.
- Ambrosini D, Galli G, Mancini B, Nardi I, Sfarra S (2014) Evaluating Mitigation Effects of Urban Heat Islands in a Historical Small Center with the ENVI-Met® Climate Model. *Sustainability* 6: 7013–7029. <https://doi.org/10.3390/su6107013>.
- Andres-Domenech I, Perales-Momparler S, Morales-Torres A, Escuder-Bueno I (2018) Hydrological Performance of Green Roofs at Building and City Scales under Mediterranean Conditions. *Sustainability* 10. <https://doi.org/10.3390/su10093105>
- Ashie Y, Ca VT, Asaeda T (1999) Building canopy model for the analysis of urban climate. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 81: 237–248.
- Bass, B., Krayenhoff, S., Martilli, A. (2002) Mitigating the urban heat island with green roof infrastructure. Urban Heat Island Summit, Toronto.
- Bengtsson L, Grahn L, Olsson J (2005) Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. *Nordic Hydrology* 36: 259–268.
- Berghage RD, Beattie DJ, Jarrett AR, Thuring C, Farzaneh R (2009) Green Roofs for Stormwater Runoff Control. US Environmental Protection Agency.
- Berghage RD, Miller C, Bass B, Moseley D, Weeks K (2010) Stormwater runoff from a large commercial roof in Chicago, Vancouver, Canada. In: Proceedings of the Cities Alive Conference 2010.
- Berkompas B, Marx KW, Wachter HM, Beyerlein D, Spencer B (2008) A Study of Green Roof Hydrologic Performance in the Cascadia Region. In: She N, Char M (eds) International Low Impact Development Conference 2008, pp 69–78.
- Bliss DJ, Neufeld RD, Ries RJ (2009) Storm Water Runoff Mitigation Using a Green Roof. *Environmental Engineering Science* 26: 407–418. <https://doi.org/10.1089/ees.2007.0186>

- Bruse M, Skinner CJ (1999) Rooftop greening and local climate: a case study in Melbourne. In: Macquarie University (ed) *Biometeorology and urban climatology at the turn of the millennium: program and abstract book*, Sydney, Australia.
- Buccola N, Spolek G (2011) A pilot-scale evaluation of greenroof runoff retention, detention, and quality. *Water, Air, and Soil Pollution* 216: 83-92. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0516-8>
- Burszta-Adamiak E (2012) Analysis of storm water retention on green roofs. *Archives of Environmental Protection* 38: 3–13. <https://doi.org/10.2478/v10265-012-0035-3>
- Carpenter DD, Kaluvakolanu P (2011) Effect of Roof Surface Type on Storm-Water Runoff from Full-Scale Roofs in a Temperate Climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE* 137: 161–169. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000185](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000185)
- Carter TL, Rasmussen TC (2006) Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association* 42: 1261-1274.
- Chen H, Ooka R, Huang H, Tsuchiya T (2009) Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation. *Building and Environment* 44: 2290–2299. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.03.012>
- Chen Y, Zhang N (2018) Urban Heat Island Mitigation Effectiveness under Extreme Heat Conditions in the Suzhou-Wuxi-Changzhou Metropolitan Area, China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 57: 235–253. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0101.1>
- Cipolla SS, Maglionico M, Semprini G, Villani V, Bonoli A (2018) Green roofs as a strategy for urban heat island mitigation in Bologna (Italy). In: Pennisi G, Cremonini L, Orsini F, Gianquinto GP (eds) *International Symposium on Greener Cities for More Efficient Ecosystem Services in a Climate Changing World*, Vol 1215: 295–299.
- Connelly M, Liu K, Schaub J (2006) BCIT Green Roof Research Program, Phase 1 Summary of Data Analysis. British Columbia Institute of Technology.
- Cui YQ, Zheng HC (2016) Impact of Three-Dimensional Greening of Buildings in Cold Regions in China on Urban Cooling Effect. In: Wong NH, Jusuf SK (eds) *Fourth International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island, (UHI 2016)*, Vol 169: 297–302.

- DeNardo JC, Jarrett AR, Manbeck HB, Beattie DJ, Berghage RD (2005) Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 48: 1491-1496.
- Fang CF (2010) Rainwater retention capacity of green roofs in subtropical monsoonal climatic regions: A case study of Taiwan. *WIT Transactions on Ecology and the Environment Conference 5th International Conference on Comparing Design in Nature with Science and Engineering, Design and Nature 2010*. Pisa, 138: 239–249. <https://doi.org/10.2495/DN100211>
- Fassman-Beck E, Voyde E, Simcock R, Hong YS (2013) 4 Living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation? *Journal of Hydrology* 490: 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.004>
- Fioretti R, Palla A, Lanza LG, Principi P (2010) Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment* 45: 1890–1904. <https://doi.org/10.1016/j.build-env.2010.03.001>
- Graceson A, Hare M, Monaghan J, Hall N (2013) The water retention capabilities of growing media for green roofs. *Ecological Engineering* 61: 328–334. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.030>
- Grant EJ (2011) Going Beyond the "Green Fuzzy": Measuring Runoff Reduction at Modular Vegetative Roofs. *Symposium of Building Envelope Technology*.
- Gregoire BG, Clausen JC (2011) Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering* 37: 963–969. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.004>
- Gromke C, Blocken B, Janssen W, Merema B, van Hooff T, Timmermans H (2015) CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Building and Environment* 83: 11–26. <https://doi.org/10.1016/j.build-env.2014.04.022>
- Günther R (2014) The role of soil water content for microclimatic effects of green roofs and urban trees – a case study from Berlin, Germany. *Journal of Heat Island Institute International* 9: 19–25.
- Hakimdavar R, Culligan PJ, Finazzi M, Barontini S, Ranzi R (2014) Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. *Ecological Engineering* 73: 494–508. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.080>

- Hamdi R, Schayes G (2008) Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. *International Journal of Climatology* 28: 973–982
- Harazono Y, Teraoka S, Nakase I, Ikeda H (1991) Effects of Rooftop Vegetation using Artificial Substrates on the Urban Climate and the Thermal Load of Buildings. *Energy and Buildings* 15 - 16: 435–442.
- Hathaway AM, Hunt WF, Jennings GD (2008) A field study of green roof hydrologic and water quality performance. *Transactions of the ASABE* 51: 37–44.
- Herrera J, Flamant G, Gironás J, Vera S, Bonilla CA, Bustamante W, Suárez F (2018) Using a Hydrological Model to Simulate the Performance and Estimate the Runoff Coefficient of Green Roofs in Semiarid Climates. *Water* 10. <https://doi.org/10.3390/w10020198>
- Hiltner RN, Lawrence TM, Tollner EW (2008) Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *Journal of Hydrology* 358: 288–293. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.010>
- Hu S, Liu L, Cao J, Chen N, Wang Z (2019) Water Resilience by Centipedegrass Green Roof: A Case Study. *Buildings* 9. <https://doi.org/10.3390/buildings9060141>
- Hutchinson D, Abrams P, Retzlaff R, Liptan T (2003) Stormwater monitoring two ecoroofs in Portland, Oregon, USA, Chicago.
- Imran HM, Kala J, Ng AWM, Muthukumaran S (2018) Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia. *Journal of Cleaner Production* 197: 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.179>
- Jamei E, Rajagopalan P (2017) Urban development and pedestrian thermal comfort in Melbourne. *Solar Energy* 144: 681–698. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.023>
- Jim CY (2015) Assessing climate-adaptation effect of extensive tropical green roofs in cities. *Landscape and Urban Planning* 138: 54–70. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.014>
- Kasmin H, Musa S (2012) Green Roof As a Potential Sustainable Structure For Runoff Reduction. *IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA 2012)*: 889–893.
- Kaufmann P (2000) Extensiv begrünte Flachdächer - ein Gewinn für die Siedlungsentwässerung: Berichte über die Versuche 1996 - 1999, Berner Fachhochschule Hochschule für Technik und Architektur.

- Knoll S (2000) Das Abflußverhalten von extensiven Dachbegrünungen. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Köhler M, Kaiser D (2019) Evidence of the Climate Mitigation Effect of Green Roofs—A 20-Year Weather Study on an Extensive Green Roof (EGR) in Northeast Germany. *Buildings* 9: 157. <https://doi.org/10.3390/buildings9070157>
- Köhler M, Schmidt M, Grimme FW, Laar M, Gusmao F (2001) Urban water retention by greened roofs in temperate and tropical climate. *Technology Resource Management & Development – Scientific Contributions for Sustainable Development*, Cologne.
- Kolb W (1987) Abflussverhältniss extensiv begrünter Flachdächer: 1. Abflußspenden und Wasserrückhaltung im Vergleich mit Kiesdächern. *Zeitschrift für Vegetationstechnik* 10: 111–116.
- Kolb W (1999) Einfluß der Oberflächenneigung auf die Abflußverhältnisse von Gründächern. *Dach + Grün* 8: 4–8.
- Kolb W (2002) Abflußverhältnisse von Gründächern. *Dach + Grün* 11: 12–18.
- Kolb W (2003) Begrünung von Leichtdächern: Vergleichende Untersuchung verschiedener Systeme. In: Pitzer J, Degenbeck M, Rausch H (eds) *Baustoff Pflanze - Nische oder Notwendigkeit*, Veitshöchheim.
- Kouhanestani ZK, Dehdari S, Jafarizadeh M (2018) Performance evaluation of green roofs in urban runoff reduction. *International Journal of Human Capital in Urban Management* 3: 61 – 68. <https://doi.org/10.22034/ijhcum.2018.03.01.007>
- Krebs G, Kuoppamäki K, Kokkonen T, Koivusalo H (2016) Simulation of green roof test bed runoff. *Hydrol. Process.* 30: 250–262. <https://doi.org/10.1002/hyp.10605>
- Kurtz T (2008) Flow Monitoring of Three Ecoroofs in Portland, Oregon. In: She N, Char M (eds) *International Low Impact Development Conference 2008*: 85–98.
- Ladani HJ, Park J-R, Jang Y-S, Shin H-S (2019) Hydrological Performance Assessment for Green Roof with Various Substrate Depths and Compositions. *KSCE Journal of Civil Engineering* 23: 1860–1871. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0270-4>

- Lalosevic MD, Komatina MS, Milos MV, Rudonja NR (2018) Green Roofs and Cool Materials as Retrofitting Strategies for Urban Heat Island Mitigation Case Study in Belgrade, Serbia. *Thermal Science* 22: 2309–2324. <https://doi.org/10.2298/TSCI171120086L>
- Lee JY, Moon HJ, Kim TI, Kim HW, Han MY (2013) Quantitative analysis on the urban flood mitigation effect by the extensive green roof system. *Environmental Pollution* 181: 257–261. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.039>
- Lee LSH, Jim CY (2019) Urban woodland on intensive green roof improved outdoor thermal comfort in subtropical summer. *International Journal of Biometeorology* 63: 895–909. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01702-4>
- Li D, Bou-Zeid E, Oppenheimer M (2014) The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters* 9: 1-16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055002>
- Liesecke H-J (1989) Forschungsprojekt Gründach: Wasserrückhaltung und Abflußspende bei Extensivbegrünung auf Flachdächern. *Das Dachdecker-Handwerk*: 37–54.
- Liesecke H-J (1993) Die Wasserrückhaltung bei extensiven Dachbegrünungen: Ergebnisse mehrjähriger Freilandversuche mit 26 Bauweisen am Standort Hannover-Herrenhausen. *Das Gartenamt* 42: 728–735.
- Liesecke H-J (1999) Extensive Begrünung bei 5° Dachneigung. *Stadt und Grün* 48: 337–346.
- Liesecke H-J (2002) Weiterentwicklung der einschichtigen Bauweise für extensive Dachbegrünungen: Teil 3: Wasserrückhaltung und Jahresabflußbeiwert. *Dach + Grün* 11: 10–13.
- Liu K (2004) Engineering performance of rooftop Gardens through field evaluation, Ottawa. National Research Council of Canada.
- Liu K, Minor J (2005) Performance evaluation of an extensive green roof. City of Toronto.
- Makido Y, Hellman D, Shandas V (2019) Nature-Based Designs to Mitigate Urban Heat: The Efficacy of Green Infrastructure Treatments in Portland, Oregon. *Atmosphere* 10. <https://doi.org/10.3390/atmos10050282>

- Mann G, Uhl M, Schiedt L (2000) Wasserhaushalt auf begrünten Dächern: Untersuchungen an der RWS-Versuchsanlage in Krauchenwies. *Stadt und Grün* 49: 246–254.
- Miller C (2000) Vegetated roof cover: Philadelphia, Pennsylvania. United States Environmental Protection Agency.
- Moghbel M, Erfanian Salim R (2017) Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO₂ content. *Urban Climate* 20: 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.012>
- Moran, Amy, Hunt, Bill, Smith J (2005) Hydrologic and water quality performance from greenroofs in Goldsboro and Raleigh, North Carolina. North Carolina State University, Department of Biological and Environmental Engineering.
- Morgan S, Celik S, Retzlaff W (2013) Green Roof Storm-Water Runoff Quantity and Quality. *Journal of Environmental Engineering* 139: 471–478. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000589](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000589)
- Müller N, Kuttler W, Barlag A-B (2014) Counteracting urban climate change: adaptation measures and their effect on thermal comfort. *Theoretical and Applied Climatology* 115: 243–257. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0890-4>
- Munck C de, Lemonsu A, Masson V, Le Bras J, Bonhomme M (2018) Evaluating the impacts of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change. *Urban Climate* 23: 260–286. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.01.003>
- Murphy D, Morgan S, Celik S, Retzlaff B (2018) Evaluation of a residential green roof system for stormwater runoff retention. *Journal of Living Architecture* 5: 16–30.
- Nardini A, Andri S, Crasso M (2012) Influence of substrate depth and vegetation type on temperature and water runoff mitigation by extensive green roofs: shrubs versus herbaceous plants. *Urban Ecosystems* 15: 697–708. <https://doi.org/10.1007/s11252-011-0220-5>
- Ouldboukhitine S-E, Belarbi R, Sailor DJ (2014) Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings. *Applied Energy* 114: 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.073>
- Palermo SA, Turco M, Principato F, Piro P (2019) Hydrological Effectiveness of an Extensive Green Roof in Mediterranean Climate. *Water* 11. <https://doi.org/10.3390/w11071378>

- Palla A, Sansalone JJ, Gnecco I, Lanza LG (2011) Storm water infiltration in a monitored green roof for hydrologic restoration. *Water Science and Technology* 64: 766-773. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.171>
- Palla A, Gnecco I, La Barbera P (2018) Assessing the Hydrologic Performance of a Green Roof Retrofitting Scenario for a Small Urban Catchment. *Water* 10. <https://doi.org/10.3390/w10081052>
- Palmaricciotti G (2015) Abbildung von Extremniederschlägen zur Berechnung des Wasserrückhalte- und Abflussverhaltens von Dachbegrünungen. In: Fachvereinigung Bauwerksbegrünung Tagungsband 13. internationales FBB-Gründachsymposium 2015: 12–16.
- Park J, Kim J-H, Dvorak B, Lee DK (2018) The Role of Green Roofs on Microclimate Mitigation Effect to Local Climates in Summer. *International Journal of Environmental Research* 12: 671–679. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0124-9>
- Pattinson T (2013) Green roof performance: A cost-benefit analysis based on Walmart's Chicago store.
- Peczkowski G, Kowalczyk T, Szawernoga K, Orzepowski W, Zmuda R, Pokladek R (2018) Hydrological Performance and Runoff Water Quality of Experimental Green Roofs. *Water* 10. <https://doi.org/10.3390/w10091185>
- Peng L, Jim C (2013) Green-Roof Effects on Neighborhood Microclimate and Human Thermal Sensation. *Energies* 6: 598–618. <https://doi.org/10.3390/en6020598>
- Peng LLH, Yang X, He Y, Hu Z, Xu T, Jiang Z, Yao L (2019) Thermal and energy performance of two distinct green roofs: Temporal pattern and underlying factors in a subtropical climate. *Energy and Buildings* 185: 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.040>
- Piro P, Carbone M, Simone M de, Maiolo M, Bevilacqua P, Arcuri N (2018) Energy and Hydraulic Performance of a Vegetated Roof in Sub-Mediterranean Climate. *Sustainability* 10. <https://doi.org/10.3390/su10103473>
- Qin X, Wu X, Chiew Y-M, Li Y (2012) A Green Roof Test Bed for Stormwater Management and Reduction of Urban Heat Island Effect in Singapore. *British Journal of Environment & Climate Change* 2: 410–420.
- Razzaghmanesh M, Beecham S (2014) The hydrological behaviour of extensive and intensive green roofs in a dry climate. *Science of the Total Environment* 499: 284–296. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.046>

- Rosenzweig C, Solecki W, Parshall L, Gaffin S, Lynn B, Goldberg R, Cox J, Hodges S (2006) Mitigating New York City's Heat Island with urban forestry, living roofs, and light surfaces.
- Sahnoune S, Benhassine N (2017) Quantifying the Impact of Green-Roofs on Urban Heat Island Mitigation. *IJESD* 8: 116–123. <https://doi.org/10.18178/ijesd.2017.8.2.932>
- Schade C (2000) Wasserrückhaltung und Abflußbeiwerte bei dünnenschichtigen Extensivbegrünungen. *Stadt und Grün* 49: 95–100.
- Schmidt M, Teschner K (2000) Kombination von Regenwasserbewirtschaftungsmassnahmen: Ergebnisse der Voruntersuchungen für das Projekt Potsdamer Platz Teil 1: Stoffrückhalt extensiver Dachbegrünung. *Wasser-Abwasser* 141: 670–675.
- Schroll E, Lambrinos J, Righetti T, Sandrock D (2011) The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate. *Ecological Engineering* 37: 595-600. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.12.020>
- Sharma A, Conry P, Fernando HJS, Hamlet AF, Hellmann JJ, Chen F (2016) Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: evaluation with a regional climate model. *Environmental Research Letters* 11. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/6/064004>
- Sherrard, Jr., James A., Jacobs JM (2012) Vegetated Roof Water-Balance Model: Experimental and Model Results. *Journal of Hydrologic Engineering* 17: 858–868. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000531](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000531)
- Sieker H, Steyer R, Büter B, Leßmann D, Tils R von, Becker C, Hübner S (2019) Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten: Abschlussbericht. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Simmons MT, Gardiner B, Windhager S, Tinsley J (2008) Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems* 11: 339–348. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0069-4>
- Sims AW, Robinson CE, Smart CC, O'Carroll DM (2019) Mechanisms controlling green roof peak flow rate attenuation. *Journal of Hydrology* 577. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123972>

- Skala V, Dohnal M, Votrubova J, Jelinkova V (2019) The use of simple hydrological models to assess outflow of two green roofs systems. *Soil and Water Research* 14: 94–103. <https://doi.org/10.17221/138/2018-SWR>
- Smith KR, Roebber PJ (2011) Green Roof Mitigation Potential for a Proxy Future Climate Scenario in Chicago, Illinois. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50: 507–522. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2337.1>
- Sobczyk M, Mrowiec M (2016) Retention capacity of extensive green roofs. *Journal of Water and Land Development* 30: 113–117. <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0027>
- Solcerova A, van de Ven F, Wang M, Rijdsdijk M, van de Giesen N (2017) Do green roofs cool the air? *Building and Environment* 111: 249–255. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.021>
- Soulis KX, Ntoulas N, Nektarios PA, Kargas G (2017) Runoff reduction from extensive green roofs having different substrate depth and plant cover. *Ecological Engineering* 102: 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.031>
- Soulis KX, Valiantzas JD, Ntoulas N, Kargas G, Nektarios PA (2017) Simulation of green roof runoff under different substrate depths and vegetation covers by coupling a simple conceptual and a physically based hydrological model. *Journal of Environmental Management* 200: 434–445. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.012>
- Speak AF, Rothwell JJ, Lindley SJ, Smith CL (2013) Reduction of the urban cooling effects of an intensive green roof due to vegetation damage. *Urban Climate* 3: 40–55. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.01.001>
- Spolek G (2008) Performance monitoring of three ecoroofs in Portland, Oregon. *Urban Ecosystems* 11: 349–359. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0061-z>
- Steusloff S (1998) Input and Output of Airborne Aggressive Substances on Green Roofs in Karlsruhe. In: Breuste J, Feldmann H, Uhlmann O (eds) *Urban Ecology*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 144–148.
- Stovin V (2010) The potential of green roofs to manage urban stormwater. *Water and Environment Journal* 24: 192–199. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2009.00174.x>

- Stovin V, Vesuviano G, Kasmin H (2012) The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology* 414-415: 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022>
- Sun T, Grimmond CSB, Ni G-H (2016) How do green roofs mitigate urban thermal stress under heat waves? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121: 5320–5335. <https://doi.org/10.1002/2016JD024873>
- Taleghani M, Sailor D, Ban-Weiss GA (2016) Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a Los Angeles neighborhood. *Environmental Research Letters* 11.
- Teemusk A, Mander U (2007) Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events. *Ecological Engineering* 30: 271-277.
- Toronto and Region Conservation Authority (2006) Evaluation of an extensive greenroof: York University, Toronto, Ontario.
- van Woert ND, Rowe DB, Andresen JA, Rugh CL, Fernandez RT, Xiao L (2005) Green Roof Stormwater Retention. *Journal of Environment Quality* 34: 1036. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0364>
- Villarreal EL, Bengtsson L (2005) Response of a Sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering* 25: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.11.008>
- Voyde E, Fassman E, Simcock R (2010) Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *Journal of Hydrology* 394:3 84–395. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.013>
- Winkler R (2017) Planungsempfehlungen für die (stadt-)klimawandelgerechte Entwicklung von Konversionsflächen: Modellvorhaben Heidelberg. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.
- Wong GKL, Jim CY (2014) Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime. *Ecological Engineering* 70: 366–378. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.025>
- Yang J, Bou-Zeid E (2019) Scale dependence of the benefits and efficiency of green and cool roofs. *Landscape and Urban Planning* 185: 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.02.004>

- Yang J, Wang Z-H, Georgescu M, Chen F, Tewari M (2016) Assessing the Impact of Enhanced Hydrological Processes on Urban Hydrometeorology with Application to Two Cities in Contrasting Climates. *Journal of Hydrometeorology* 17: 1031–1047. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0112.1>
- Yang W-Y, Li D, Sun T, Ni G-H (2015) Saturation-excess and infiltration-excess runoff on green roofs. *Ecological Engineering* 74: 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.10.023>
- Zhang G, He B-J, Zhu Z, Dewancker BJ (2019) Impact of Morphological Characteristics of Green Roofs on Pedestrian Cooling in Subtropical Climates. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16. <https://doi.org/10.3390/ijerph16020179>
- Zhang N, Chen Y, Luo L, Wang Y (2017) Effectiveness of Different Urban Heat Island Mitigation Methods and Their Regional Impacts. *Journal of Hydrometeorology* 18: 2991–3012. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0049.1>
- Zhang Q, Miao L, Wang X, Liu D, Zhu L, Zhou B, Sun J, Liu J (2015) The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. *Landscape and Urban Planning* 144: 142–150.
- Žuvela-Aloise M, Andre K, Schwaiger H, Bird DN, Gallaun H (2018) Modelling reduction of urban heat load in Vienna by modifying surface properties of roofs. *Theoretical and Applied Climatology* 131: 1005–1018. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2024-2>

7.2 Tabellenanhang

Tabellenanhang 1: hydrologische und klimatische Parameter während des Messzeitraums 2015-2020, gemessen am HCU-Dach und an der Luftmessnetzstation Markmannstraße.

Jahr	Monat	Dach HCU					Station Markmannstraße				
		Niederschlag [mm]			Abfluss [mm]	Retention [%]	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Globalstrahlung [kWh/m ²]	
		Monats-Mittelwert	Anzahl Regenereignisse	Monats-Summe	Summe	Monats-Mittelwert	Monats-Mittelwert	Monats-Mittelwert	Monats-Mittelwert	Monats-Summe	
2015	3	12,4	4	49,5	23,6	52,3	5,9	75,7	3,8	27	
	4	4,4	7	30,5	9,3	69,5	9,1	66,6	3,5	131	
	5	2,2	21	45,6	12,7	72,1	12,2	67,2	3,3	135	
	6	3,0	13	38,5	9,3	75,8	15,8	64,7	2,8	162	
	7	4,3	25	107,3	32,2	70,0	18,7	68,8	3,3	153	
	8	6,6	16	105,1	35,8	65,9	19,9	70,1	2,7	131	
	9	4,4	20	88,6	37,1	58,1	14,4	78,1	3,1	86	
	10	3,4	12	41,0	18,1	55,9	9,7	83,7	2,7	50	
	11	5,6	28	155,7	79,8	48,7	8,5	86,4	3,7	21	
	12	2,0	21	41,1	19,8	51,8	8,4	82,1	4,0	15	
	2016	1	1,9	21	40,4	23,7	41,3	1,3	87,3	3,7	16
		2	4,9	20	97,4	59,6	38,8	3,9	83,3	3,8	33
3		2,3	14	31,7	10,1	68,1	5,1	80,2	3,3	64	
4		2,7	20	54,2	22,6	58,3	8,5	72,2	3,4	109	
5		3,8	13	49,3	17,2	65,1	15,2	66,6	3,5	161	
6		6,4	19	122,0	52,1	57,3	18,2	71,2	3,0	154	
7		3,4	20	68,6	23,6	65,6	19,2	70,9	3,0	142	
8		2,4	20	47,3	13,9	70,6	18,3	71,5	3,0	128	
9		4,1	8	32,4	9,6	70,4	18,4	70,2	2,7	100	
10		1,5	20	30,3	10,1	66,7	9,6	86,5	2,9	37	

ANHANG

	11	2,1	22	46,6	25,9	44,4	4,5	86,0	3,0	21
	12	4,2	15	62,4	37,3	40,2	4,8	87,4	3,3	13
2017	1	4,1	15	61,5	34,6	43,7	1,0	85,7	3,1	18
	2	5,1	12	61,3	39,4	35,7	2,9	81,9	3,8	27
	3	6,7	11	73,8	50,5	31,6	7,8	73,9	3,2	73
	4	2,8	18	49,7	22,7	54,3	8,0	72,5	3,7	109
	5	5,2	14	72,7	31,2	57,1	14,6	69,7	3,5	149
	6	7,4	19	141,2	63,4	55,1	17,5	71,2	3,5	153
	7	6,1	19	115,2	50,1	56,5	17,9	73,8	2,9	137
	8	3,7	18	66,8	18,8	71,9	18,3	72,1	2,8	123
	9	3,5	18	63,4	23,2	63,4	14,5	81,1	2,8	80
	10	7,6	17	130,0	53,3	59,0	12,3	84,1	3,6	43
	11	4,7	19	88,7	45,0	49,3	6,7	89,2	3,1	19
	12	3,2	21	66,7	48,6	27,1	4,4	89,0	3,8	11
2018	1	5,9	17	99,5	54,5	45,2	3,9	86,8	3,8	15
	2	1,3	7	9,2	2,7	70,7	-0,3	77,5	3,1	45
	3	4,4	13	57,6	49,4	14,2	2,5	74,3	3,8	66
	4*	2,2	1	2,2	3,0	-36,4	12,2	70,4	3,3	115
	6	4,0	11	44,4	39,0	12,2	18,3	66,6	3,3	151
	7	10,0	4	39,8	17,2	56,8	21,1	60,7	3,2	189
	8	2,4	14	34,0	7,4	78,2	20,4	64,0	3,1	136
	9	2,5	10	24,8	5,0	79,8	16,2	69,1	3,0	95
	10	3,1	13	40,6	16,2	60,1	12,0	77,1	3,3	58
	11	1,5	8	11,6	4,7	59,5	6,2	86,4	3,3	22
	12	4,2	20	84,7	57,2	32,5	5,6	89,9	3,7	11
2019	1	5,2	12	62,6	29,8	52,4	2,6	84,9	4,0	16
	2	3,5	8	28,0	9,7	65,4	5,9	74,6	3,4	40
	3	3,2	24	77,3	12,4	84,0	7,4	79,0	4,1	57
	4	1,6	10	15,7	0,7	95,5	10,4	63,1	3,6	136

ANHANG

	5	2,7	9	24,6	1,3	94,7	11,9	69,1	3,6	137
	6	3,4	11	37,8	2,3	93,9	20,2	64,3	3,2	172
	7	5,0	13	65,0	11,1	82,9	18,8	68,7	3,1	138
	8	2,2	16	34,6	2,3	93,4	20,2	67,6	1,8	134
	9	4,7	18	83,8	25,0	70,2	15,1	75,7	2,1	86
	10	4,6	20	92,1	44,5	51,7	11,2	84,7	2,1	49
	11	2,9	13	38,2	22,6	40,8	6,2	91,6	1,9	20
	12	3,1	19	58,1	15,2	73,8	5,4	86,2	2,4	15
2020	1	4,1	19	77,4	39,7	48,7	5,8	88,0	2,7	18
	2	4,9	26	126,5	51,9	59,0	6,2	81,1	3,4	29
	3	3,2	13	41,2	12,7	69,2	6,3	65,2	2,8	87
	4	1,8	6	10,7	1,0	90,7	10,3	59,7	2,7	153
	5	2,6	11	28,9	4,4	84,8	12,5	64,2	2,3	161
	6	4,4	12	53,2	10,1	81,0	18,4	66,1	2,5	173
	7	5,0	18	90,8	27,0	70,3	17,1	69,9	2,1	136

7.3 Digitaler Anhang

Tabellenanhang 2: Datenbank mit extrahierten Informationen der mittels systematischen Review-Verfahrens identifizierten Publikationen zur Verarbeitung in der Meta-Analyse. Die farblichen Hintergründe kennzeichnen bibliographische & geographische Eigenschaften (grün), technisch-ökologische Charakteristiken der in den Studien verwendeten Dachbegrünungen (rot) und die Ergebnisse der in den Studien durchgeführten hydrologischen Untersuchungen (blau).

Tabellenanhang 2 ist im digitalen Anhang vorhanden (Digitaler Anhang 7.3.pdf).

Tabellenanhang 3: Datenbank mit extrahierten Informationen der mittels systematischen Review-Verfahrens identifizierten Publikationen zur Verarbeitung in der Meta-Analyse. Die farblichen Hintergründe kennzeichnen bibliographische & geographische Eigenschaften (grün), technisch-ökologische Charakteristiken der in den Studien verwendeten Dachbegrünungen (rot) und die Ergebnisse der in den Studien durchgeführten Untersuchungen zur Beeinflussung der Umgebungstemperatur (blau).

Tabellenanhang 3 ist im digitalen Anhang vorhanden (Digitaler Anhang 7.3.pdf).