

Hochschule Weihenstephan – Triesdorf

Fakultät Umweltingenieurwesen

Studiengang Wassertechnologie

B a c h e l o r a r b e i t

**Auslegung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit einer Dachbegrünung im Vergleich
zu einem konventionellen System am Beispiel des Neubaus Handelszentrum
der HTI in Röttenbach**

eingereicht von: Johannes Haus

Erstkorrektor: Prof. Dr.-Ing. Oliver Christ

Tag der Abgabe: 22.08.2019

Inhaltsverzeichnis	
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Abkürzungsverzeichnis.....	X
1. Problemfeld Stadt.....	- 11 -
2. Grundlagen der Dachbegrünungen.....	- 12 -
2.1 Begrünungsarten und Regelaufbau	- 12 -
2.2 Systemaufbau von Dächern	- 16 -
2.3 Vorgänge zur Abflussbildung auf dem Gründach.....	- 18 -
2.4 Individuelle Vorteile und Nachteile für den Bauherren	- 19 -
2.5 Gemeinnützige Vorteile	- 23 -
3. Material und Methoden	- 28 -
3.1 Beschreibung des Daches und der Messeinrichtungen	- 28 -
3.2 Methodik Niederschlags-Abfluss-Verhältnisse	- 32 -
3.2.1 Jahresabflussbeiwert ψ_a / Jahreszeitlicher Abflussbeiwert	- 32 -
3.2.2 Ermittlung der Wasserspeicherkapazität und Wassersättigung	- 33 -
3.2.3 Ermittlung der mittleren Wassersättigung	- 35 -
3.2.4 Ermittlung der Abflussbeiwerte C_s und C_m	- 36 -
3.2.5 Schnee Betrachtung.....	- 39 -
3.3 Methodik Raumklima.....	- 40 -
3.3.1 Temperaturzusammenhänge	- 40 -
3.3.2 Luftfeuchtigkeitsbeziehungen	- 42 -
3.4 Methodik Modellberechnungen	- 43 -
3.4.1 RRB-Verkleinerung.....	- 43 -
3.4.2 Einfluss der Verzögerung der Abflussscheitel.....	- 45 -
3.4.3 Verdunstung – Entgegenwirkung der Urban Heat Island.....	- 47 -
3.5 Methodik Wirtschaftlichkeitsberechnung	- 48 -

4. Ergebnisse.....	- 52 -
4.1 Zustand der Dachflächen Messeinrichtungen	- 52 -
4.1.1 Zustand der verschiedenen Dachflächen.....	- 52 -
4.1.2 Lysimeter	- 53 -
4.2 Ergebnisse Niederschlags-Abfluss-Verhältnisse	- 54 -
4.2.1 Jahresabflussbeiwert / Jahreszeitlicher Abflussbeiwert	- 54 -
4.2.2 Wasserspeicherkapazität der extensiven Dachbegrünung	- 56 -
4.2.3 Wasserspeicherkapazität und Wassersättigung	- 58 -
4.2.4 Ermittelte Abflussbeiwerte für Cs und Cm	- 59 -
4.2.5 Schnee Betrachtung.....	- 62 -
4.3 Ergebnisse Raumklima	- 64 -
4.3.1 Temperaturzusammenhänge	- 64 -
4.3.2 Luftfeuchtigkeitsbeziehungen	- 64 -
4.4 Ergebnisse der Modellberechnungen.....	- 65 -
4.4.1 Einfluss einer großflächigen Begrünung auf RRB-Volumen	- 65 -
4.4.2 Einfluss der Verzögerung der Abflussscheitel.....	- 66 -
4.4.3 Quantifizierung der Verdunstungsmenge.....	- 67 -
4.5 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	- 69 -
5. Diskussion	- 70 -
5.1 Beschreibung des Dachzustandes und der Messeinrichtungen	- 70 -
5.1.1 Dachzustand.....	- 70 -
5.1.1 Lysimeter	- 70 -
5.2 Diskussion Niederschlag-Abfluss-Verhältnisse	- 72 -
5.2.1 Jahresabflussbeiwert / Jahreszeitlicher Abflussbeiwert	- 72 -
5.2.2 Wasserspeicherkapazität und Wassersättigung	- 76 -
5.2.3 Ermittlung der mittleren Wassersättigung	- 77 -
5.2.4 Abflussbeiwerte Cs und Cm.....	- 78 -
5.2.5 Schnee Betrachtung.....	- 83 -

5.3	Diskussion Raumklima	- 84 -
5.3.1	Temperaturzusammenhänge	- 84 -
5.3.2	Luftfeuchtigkeitsbeziehungen	- 85 -
5.4	Diskussion Modellberechnungen	- 85 -
5.4.1	Diskussion RRB	- 85 -
5.4.2	Diskussion Einfluss der Verzögerung auf die Abflussspitzen.....	- 86 -
5.4.3	Diskussion Verdunstung – Urban Heat Island	- 87 -
5.5	Diskussion Wirtschaftlichkeitsberechnung	- 88 -
6.	Zusammenfassung	- 90 -
7.	Literaturverzeichnis.....	- 91 -
8.	Anhang	- 98 -
8.1	Dachflächen und Messeinrichtungen	- 98 -
8.2	Niederschlag-Abfluss-Verhältnisse.....	- 101 -
8.2.1	Jahresabflussbeiwert / Jahreszeitlicher Abflussbeiwert	- 101 -
8.2.2	Vorgehen zur Ermittlung der Wasserspeicherkapazität	- 102 -
8.2.3	Abflussbeiwerte Cs und Cm.....	- 104 -
8.3	Raumklima	- 105 -
8.4	Modellberechnungen.....	- 114 -
8.4.1	RRB Volumeneinsparpotential.....	- 114 -
8.4.2	Quantifizierung der Verdunstungsmenge.....	- 118 -

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1</i> Aufbau von Dachbegrünungen (nach JÄNIKE 2017).....	- 13 -
<i>Abbildung 2</i> Nutzungsdauer von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (modifiziert nach BBSR, 2011)	- 19 -
<i>Abbildung 3</i> Oberflächentemperaturen im Tagesgang einer konventionellen Dachfläche und einer extensiven Dachbegrünung (nach SENATSVERWALTUNG BERLIN, 2010)	- 20 -
<i>Abbildung 4</i> Abflussregime natürlicher Boden (LFU Bayern, JAHR)	- 25 -
<i>Abbildung 5</i> Abflussregime befestigte Fläche (LFU Bayern, JAHR).....	- 25 -
<i>Abbildung 6</i> Darstellung der Urban Heat Island (nach SCHUSTER, 2015).....	- 26 -
<i>Abbildung 7</i> Qualitative Änderung der Wasserbilanz einer Siedlung bei zunehmender Bebauung (nach DWA-M 153, 2007).....	- 27 -
<i>Abbildung 8</i> Luftbildaufnahme der HTI Gienger in Röttenbach (HTI, OJ)	- 28 -
<i>Abbildung 9</i> Einteilung der Dachflächen (modifiziert nach HTI, OJ)	- 29 -
<i>Abbildung 10</i> Einteilung der Räume unter den Dachflächen (modifiziert nach HTI, OJ)	- 31 -
<i>Abbildung 11</i> Definition des Spitzenabflussbeiwertes C_s bzw. ψ_s (nach GUJER, 2006)	- 37 -
<i>Abbildung 12</i> Fehlendes Gefälle zur Dachentwässerung (eigene Aufnahme, 2019)...	- 53 -
<i>Abbildung 13</i> Jahreswasserhaushalt im Vergleich zwischen Gründach und Foliendach (eigene Darstellung, 2019)	- 54 -
<i>Abbildung 14</i> Wasserhaushalt Foliendach für die Jahre 2018/19 (eigene Darstellung, 2019)	- 55 -
<i>Abbildung 15</i> Wasserbilanz für das Gründach für die Jahre 2018/19 (eigene Darstellung, 2019)	- 56 -
<i>Abbildung 16</i> Verteilung der Gewichte des Gründachs bei Erreichung der 100% Sättigung (eigene Darstellung, 2019)	- 57 -
<i>Abbildung 17</i> Darstellung der längsten Trockenperiode (eigene Darstellung, 2019) ...	- 57 -
<i>Abbildung 18</i> Abflussbesonderheit im Hochsommer vom 05.07.2018 (eigene Darstellung, 2019)	- 61 -

Abbildung 19 Probleme bei der Gewichtserfassung der Lysimeter während Frostperioden (eigene Darstellung, 2019)	62 -
Abbildung 20 Verhalten der Lysimeter bei Temperaturen unter 0°C (eigene Darstellung, 2019)	63 -
Abbildung 21 Kostenentwicklung der beiden Dachflächen (eigene Darstellung, 2019) -	69 -
Abbildung 22 Produktbeschreibung der Lysimeter (nach UGT, 2016).....	71 -
Abbildung 23 3-Tageshöchsttemperaturen – Niederschlagsverteilung Frühling 2017 und Frühling 2018 (eigene Darstellung, 2019).....	74 -
Abbildung 24 3-Tageshöchsttemperaturen – Niederschlagsverteilung Herbst 2017 und Herbst 2018 (eigene Darstellung, 2019).....	75 -
Abbildung 25 Abflussverhalten 05.07.2018 (eigene Darstellung, 2019)	82 -
Abbildung 26 Schnitt durch die extensive Begrünung „Steinrosenflur“ (nach GOLLER, 2016)	98 -
<i>Abbildung 27 Dachaufsicht HTI-Gienger (eigene Aufnahme, 2019).....</i>	<i>98 -</i>
Abbildung 28 Zustand extensive Dachbegrünung (eigene Aufnahme, 2019).....	99 -
Abbildung 29 guter Zustand des Gründachlysimeters (eigene Aufnahme, 2019) .	99 -
Abbildung 30 Zustand Foliendachlysimeter (eigene Aufnahme, 2019).....	99 -
Abbildung 31 Schichtaufbau Foliendachlysimeter (eigene Aufnahme, 2019).....	100 -
Abbildung 32 Kinetik des Abflussvorgangs bei der extensiven Dachbegrünung (eigene Darstellung, 2019)	102 -
<i>Abbildung 33 Systemaufbau „Steinrosenflur“ (nach ZINCO, 2018)</i>	<i>103 -</i>
<i>Abbildung 34 Aufbau extensive Dachbegrünung HTI (nach GOLLER, 2016)...</i>	<i>104 -</i>
<i>Abbildung 35 Technische Daten Floradrain FD 25 (nach ZINCO, 2019).....</i>	<i>104 -</i>
<i>Abbildung 36 Bei HTI verbaute Dränschicht Floradrain FD 40 (nach ZINCO, 2019)...</i>	<i>104 -</i>

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Einteilung der Jahreszeiten.....	- 33 -
Tabelle 2 Festsetzungen für die Berechnung des RRB-Volumens nach dem „einfachen Verfahren“	- 44 -
Tabelle 3 Jahresabflussbeiwerte der Jahre 2017 und 2018	- 54 -
Tabelle 4 Niederschlag/Abfluss-Bilanzen der Jahre 2017/2018	- 54 -
Tabelle 5 Jahreszeitliche Abflussbeiwerte Foliendach	- 54 -
Tabelle 6 Wasserbilanz Foliendach.....	- 55 -
Tabelle 7 Jahreszeitliche Abflussbeiwerte Gründach	- 55 -
Tabelle 8 Wasserbilanz Gründach.....	- 56 -
Tabelle 9 Mittlere Wassersättigung des Gründaches	- 58 -
Tabelle 10 Ermittlung von Cs für das Gründach	- 59 -
Tabelle 11 Ermittlung von Cm für das Gründach.....	- 60 -
Tabelle 12 Statistischer Zusammenhang Temperatur	- 64 -
Tabelle 13 Statistischer Zusammenhang Luftfeuchtigkeit.....	- 65 -
Tabelle 14 Benötigtes RRB-Volumen in Abhängigkeit des Abflussbeiwertes	- 66 -
Tabelle 15 Verdunstungsmenge verdichtete hohe Innenstadtbebauung.....	- 68 -
Tabelle 16 Verdunstungsmenge verdichtete mittlere Bebauung	- 68 -
Tabelle 17 Verdunstungsmenge lockere Bebauung	- 68 -
Tabelle 18 Vergleich der Regenereignisse ab 4mm Niederschlag der Jahre 2017/18.....	- 73 -
Tabelle 19 Literaturwerte für Cs	- 79 -
Tabelle 20 Literaturwerte für Cm bei Gründächern ab 10 cm Aufbau und maximal 5 % Gefälle	- 80 -
Tabelle 21 Berechnung der benötigten Energie für vollständige Verdunstung	- 82 -
Tabelle 22 Anhaltswerte für den Jahresabflussbeiwert in Abhängigkeit der Aufbaudicke (FLL, 2018)	- 101 -
Tabelle 23 Vorgehen zur Ermittlung des Vollstättigungsgewichtes	- 102 -
Tabelle 24 Ergebnisse der statistischen Auswertung zu den Temperaturzusammenhängen.....	- 105 -
Tabelle 25 Ergebnisse der statistischen Auswertungen zu den Luftfeuchtigkeitsbeziehungen	- 109 -
Tabelle 26 Festsetzungen für die verdichtete hohe Innenstadtbebauung	- 114 -

Tabelle 27 Festsetzungen für die verdichtete mittlere Bebauung	- 115 -
Tabelle 28 Festsetzungen für die lockere Bebauung.....	- 116 -
Tabelle 29 Mittlere Verdunstungsraten der extensiven Dachbegrünung im Jahresgang.....	- 118 -
Tabelle 30 Energiebilanzen bezogen auf 1 m ² Dachbegrünung	- 118 -

Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
a	Jahr	1
A_D	Größe der Dachflächen	m^2
$A_{D,g}$	Begrünbare Dachflächen	m^2
$A_{D,ng}$	Nicht begrünbare Dachflächen	m^2
A_E	Einzugsgebietsfläche	m^2
$A_{E,nb}$	Nicht befestigte Fläche des Einzugsgebietes	m^2
A_u	Undurchlässige Fläche des Einzugsgebietes	m^2
A_V	Verkehrsflächen	m^2
C_m	Mittlerer Abflussbeiwert	-
C_s	Spitzenabflussbeiwert	-
d_i	Innendurchmesser	mm
Ψ_a	Jahresabflussbeiwert	-
f_A	Abminderungsfaktor	-
f_i	Flächenanteil	-
f_z	Zuschlagsfaktor	-
T	Wiederkehrzeit	a
V_{RRB}	Speichervolumen Regenrückhaltebecken	m^3

1. Problemfeld Stadt

In den letzten Jahren wurde der Einfluss des Klimawandels immer deutlicher. In Deutschland kommt es dadurch zu Starkregenereignissen und langen Trockenperioden. Städte sind durch ihren Aufbau in besonderem Maß von den Folgen betroffen. Gründe dafür sind die hohe Bevölkerungsdichte, starken Oberflächenversiegelung und -erwärmung und Luftverschmutzung (KUTTLER, 2011a). So kann es zu urbanen Sturzfluten kommen, bei denen große Mengen Niederschlag in kurzer Zeit anfallen, welche zu Überflutungen führen können. Dies ist unter anderem im Jahr 2016 in Simbach am Inn aufgetreten und hatte dort katastrophale Folgen.

Aber auch die länger werdenden Trockenperioden stellen ein Problem für urbane Gebiete dar. Die Problematik mit Urban Heat Islands, einer Störung und Aufheizung des städtischen Klimas, intensiviert sich und führt so zu einer Gefährdung der menschlichen Gesundheit (SENATSVERWALTUNG BERLIN, 2010). So lassen sich allein in Berlin 490 Todesfolgen, vor allem von älteren Menschen, dem Hitzesommer 2018 zuordnen (RKI, 2019).

Es wird immer wichtiger Lösungen für diese Problematik zu finden. Dies liegt zum einen am immer weiter fortschreitenden Klimawandel, zum anderen aber auch an der zunehmenden Urbanisierung einhergehend mit dem demographischen Wandel (SCHULZE DIECKHOFF, et al.).

Schon jetzt fordert das Baugesetzbuch (BMJV, 2017) in §1a die Städte und Gemeinden dazu auf, bei der Erstellung von Bauleitplänen u.a. Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken und Maßnahmen, die einer Anpassung an den Klimawandel dienen anzuwenden.

Aufgrund der oben genannten Probleme soll durch diese Studie die Möglichkeit der Begrünung von Dächern als Maßnahme geprüft werden. Hierfür wurde von der Firma *HTI Gienger* ein Probedach mit verschiedenen Messeinrichtungen erstellt, um vergleichende Analysen durchzuführen. Dabei soll die Bedeutung einer Dachbegrünung für den Bauherrn unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten geprüft werden. Weiterführend sollen die Auswirkungen großflächiger Dachbegrünungen bezogen auf Retentionsverhalten und Verdunstungsleistung in urbanen Gebieten untersucht werden.

2. Grundlagen der Dachbegrünungen

2.1 Begrünungsarten und Regelaufbau

Grundsätzlich sind drei verschiedene Begrünungsarten voneinander zu unterscheiden. Die Intensivbegrünung, die einfache Intensivbegrünung und die Extensivbegrünung (FLL, 2018). Im Folgenden werden die drei verschiedenen Begrünungsarten kurz vorgestellt.

Bei der **Intensivbegrünung** können fast alle Pflanzen verwendet werden, die auch bei erdgebundenen Gärten verwendet werden können (KOLB und SCHWARZ, 1999). Es sind kaum Einschränkungen vorhanden, weshalb Stauden, Gräser, Blumen oder Gehölze angelegt werden können (FLL, 2018). Intensivbegrünungen stellen die hochwertigste Form der Dachbegrünung aus ökologischer und wasserwirtschaftlicher Sicht dar, benötigen aber eine intensive Pflege, einhergehend mit Bewässerung und Nährstoffversorgung, um langfristig funktionsfähig zu bleiben (FLL, 2018). Sie sind zugleich die Begrünungsmethode mit den höchsten Investitionskosten und haben eine Aufbaudicke zwischen 25 bis 100 cm (KOLB und SCHWARZ, 1999).

Bei der **einfachen Intensivbegrünung** wird auf höhere Sträucher und Gehölze verzichtet, woraus sich reduzierte Bauhöhen von 15 bis 25 cm für die Aufbauhöhe ergeben (KOLB und SCHWARZ, 1999). Die verwendeten Pflanzen haben niedrigere Ansprüche an Schichtaufbau, Pflege, Wasser und Nährstoffversorgung, als Pflanzen, die bei Intensivbegrünungen verwendet werden (FLL, 2018). Oft wird die einfache Intensivbegrünung mit der Extensivbegrünung kombiniert, beispielsweise über tragend Wänden, wo eine Erhöhung der zulässigen Auflast nicht möglich ist. (KOLB und SCHWARZ, 1999).

Im Gegensatz zu den intensiven Begrünungsvarianten, sticht die **Extensivbegrünung** durch ihre geringe Aufbauhöhe hervor (KOLB und SCHWARZ, 1999). Durch diesen geringen Aufbau bedingt, stehen bei einer extensiven Dachbegrünung nicht alle Pflanzen zur Verfügung (KOLB und SCHWARZ, 1999). Bei geringen Schichtdicken zwischen 5 bis 15 cm ist davon auszugehen, dass diese Flächen Extremstandorte darstellen, die durch Trockenheit geprägt sind (KOLB und SCHWARZ, 1999). Daher muss bei der Wahl der Pflanzen darauf geachtet werden, dass Pflanzen gewählt werden, die ein hohes Potenzial bieten, sich an stark schwankende Standortbedingungen anzupassen (FLL, 2018). Idealerweise sollten sie dem mitteleuropäischen Florenraum entstammen bzw. sich mit dem hier vorherrschenden Klima arrangieren können (FLL, 2018). Die Extensivbegrünungen zeichnen sich im Vergleich mit Intensivbegrünungen durch einen erheblich reduzierten Umfang von Pflegemaßnahmen und Erstinvestitionskosten ab (FLL, 2018). Extensive Dachbegrünungen haben statische Voraussetzungen von 0,5 – 2 kN/m² (KOLB und SCHWARZ, 1999).

Der Grundaufbau aller oben genannten Begrünungsarten lässt sich von einem gewachsenen Boden ableiten (FLL, 2018). In der nachfolgenden Abbildung ist schematisch der Aufbau einer Dachbegrünung dargestellt. Die einzelnen Funktionsschichten werden im Anschluss kurz erklärt. Der Regelschichtaufbau der Funktionsschichten setzt sich zusammen aus Vegetationsdecke, Vegetationstragschicht, Filterschicht, Drainschicht, Schutzlage(n) und Dachaufbau.

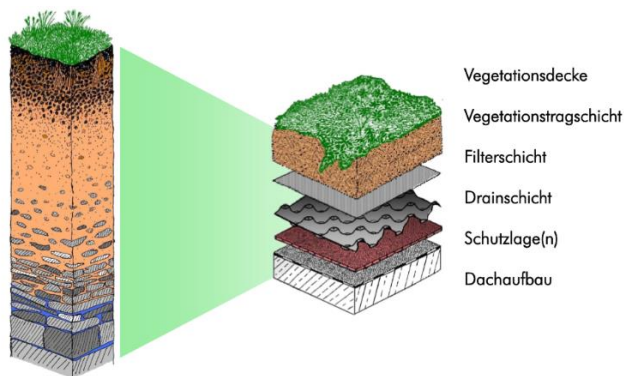


Abbildung 1 Aufbau von Dachbegrünungen (nach JÄNIKE 2017)

Die **Vegetationsdecke** bestimmt das Aussehen der Begrünung. Je nach zur Verfügung stehender durchwurzelbaren Aufbaudicke können verschiedenste Pflanzengemeinschaften realisiert werden. Unter Einbeziehung der Leistungsfähigkeit, Belastbarkeit und des Pflegeaufwandes und der mit der Begrünung verbundenen Zielen sind viele verschiedene Begrünungen möglich (KOLB und SCHWARZ, 1999).

Allgemein lässt sich sagen, dass je höher die Aufbaudicke der Vegetationstragschicht ist, desto anspruchsvollere Pflanzen können auf dem Dach eingesetzt werden (KOLB und SCHWARZ, 1999).

Die **Vegetationstragschicht** bildet das Substrat für das Pflanzenwachstum. Sie muss Pflanzenwachstum ermöglichen, eine ausreichende Wasserspeicherkapazität aufweisen, gleichzeitig aber auch eine hohe Wasserdurchlässigkeit bereitstellen, um sicherzustellen, dass bei Starkregen Überflutungen der Flächen auszuschließen sind (KOLB und SCHWARZ, 1999) Des Weiteren muss Sie ausreichend Luftporenvolumen, Nährstoffspeicher und Strukturstabilität (Wurzelaum) bieten, um langfristig optimale Bedingungen für das Pflanzenwachstum bereitstellen zu können (KOLB und SCHWARZ, 1999). Die Dicke der Vegetationstragschicht ist dabei abhängig, von der Dachbauweise/-art und den Zielen, die mit der Begrünung erreicht werden sollen (FLL, 2018)]

Als nächste Lage im Regelschichtaufbau folgt die **Filterschicht**. Diese hat die Aufgabe das Ausspülen von Bestandteilen aus der Vegetationstragschicht zu verhindern. Damit wird die Funktion der Dränschicht und der Abflussleitungen gesichert. (KOLB und SCHWARZ, 1999). Wichtig ist bei der Filterschicht zudem, dass sie für durchwurzelbar ist, um den Pflanzen auch in der Dränschicht ein hohes Wurzelvolumen zu ermöglichen (FLL, 2018).

Dränschichten können aus mineralischen Schüttstoffen (Kies, Blähton, ...), Dränmatten oder Dränplatten hergestellt werden. Die Entscheidung, wie die Dränschicht ausgeführt werden soll, hängt einerseits von den bautechnischen Erfordernissen ab, wie der Lastannahme oder der schützenden Funktion. Andererseits ist sie abhängig von den Ansprüchen der Vegetation der Vegetationstragschicht. In den meisten Fällen verhindert die Dränschicht das Zustandekommen von Staunässe, darüberhinaus ist es möglich durch geeignete Wahl der Dränmaterialien eine zusätzliche Wasserspeicherung zu integrieren. (KOLB und SCHWARZ, 1999) Bei Schüttstoffen wird dies durch die Wasserspeicherkapazität realisiert, bei Dränschichten aus Kunststoff wird dies durch plastische Ausformungen, in denen sich das Wasser sammelt, erreicht (KOLB, 2016). Da die Filterschicht durchwurzelbar ist, erreichen die Pflanzen den Wasserspeicher (FLL, 2018).

Die **Schutzlagen** schützen die Dachdichtung während der Bauphase, aber auch später bei Pflege und Unterhaltungsmaßnahmen vor mechanischen Einwirkungen (KOLB und SCHWARZ, 1999). Es gibt dabei mehrere Wege, wie die Schutzlage hergestellt werden kann. Diese kann aus Kunststoffen, Estrich oder in Form von Speicherschutzmatten, die neben dem Schutzaspekt auch noch Wasser speichern können, realisiert werden (KOLB, 2016).

Eine **Dachabdichtung** kann mit Hilfe unterschiedlicher Materialien hergestellt werden, es ist möglich die Abdichtung mittels Polymer-Bitumenbahnen, Kunststoffbahnen oder Elastomerbahnen verwendet werden (KOLB, 2016). Die FLL - Dachbegrünungsrichtlinien (2018) fordern ein Mindestgefälle zur Entwässerung des Daches von 2 %, damit es nicht zu Staunässe führt, die sowohl Dachabdichtung als auch die Vegetation schädigen würde.

Die unterschiedlichen Möglichkeiten der Dachaufbauten werden im nachfolgenden Kapitel aufgeführt.

In Abhängigkeit davon, welche Stoffe für die einzelnen Schichten verwendet wurden, kann es nach FLL-Dachbegrünungsrichtlinie (2018) sein, dass einzelne Schichten mehrere Funktionen übernehmen.

Infolge dessen können einschichtige und mehrschichtige Bauweisen unterschieden werden. Der einschichtige Aufbau besteht aus einer Vegetationstragschicht mit Drän- und Filterfunktion, beim mehrschichtigen werden entweder getrennt ausgebildete Drän-, Filter- und Vegetationsschicht verwendet oder eine Drän- und eine Vegetationsschicht, welche durch die stoffliche Zusammensetzung die Filterfunktion mit übernehmen.

2.2 Systemaufbau von Dächern

Der Systemaufbau der Dachkonstruktion bildet die Unterlage für die Dachbegrünung. Die unterschiedlichen Konstruktionen unterscheiden sich bezüglich der Anordnung der Wärmedämmung, es können Warmdach, Kaltdach und Umkehrdach unterschieden werden (KOLB und SCHWARZ, 1999). Alle Konstruktionsvarianten bieten unterschiedliche Möglichkeiten im Blick auf Belastbarkeit und Begrünungsmöglichkeiten. (KOLB und SCHWARZ, 1999). Im Folgenden wird nur auf Dachkonstruktionen eingegangen, die eine Wärmedämmung besitzen.

Eine Dachkonstruktion wird als **Warmdach**, einschaliges Dach oder nicht durchlüftetes Dach bezeichnet, wenn die Decke des darunter liegenden Raumes zugleich die Tragkonstruktion der Dachfläche bildet (KOLB, 2016). Bei dieser Art der Konstruktion muss baulich darauf geachtet werden, dass keine warme Luft aus dem Raum unter der Decke in die Wärmedämmung eindringen kann. (KOLB und SCHWARZ, 1999). Sonst kann es im Winter bei großen Temperaturunterschieden zwischen Raumluft und Außenluft dazu kommen, dass der in die Dachdämmung eindringende Wasserdampf dort kondensiert und zu Schäden, wie verringerter Wärmedämmfähigkeit führen kann. (KOLB und SCHWARZ, 1999). Um dies zu verhindern werden i.d.R. Dampfsperren eingebaut, diese bestehen zumeist aus Bitumenbahnen oder Kunststofffolien (KOLB, 2016). Um die Dachdämmung gegen von oben eindringendem Wasser zu schützen, befindet sich über der Dämmung eine

Dachabdichtung. (KOLB und SCHWARZ, 1999). Auf dieser Dachkonstruktion können alle Begrünungsarten und Vegetationsformen verwendet werden, außer es handelt sich um Leichtkonstruktionen, dann sind nur geringere Lastannahmen möglich (FLL, 2018). Dies ist vor dem Beginn der Begrünungsarbeiten zu prüfen. (FLL, 2018)

Das **Kaltdach**, welches auch als zwei- bzw. mehrschaliges oder durchlüftetes Dach bezeichnet wird, weist wie auch das Warmdach i.d.R. eine Dampfsperre unterhalb der Wärmedämmung auf. (KOLB, 2016). Des Weiteren wird das Problem der Kondensatbildung dadurch bewältigt, dass innerhalb bzw. oberhalb der Wärmedämmung Lüftungsschlitze vorhanden sind, die mit der Außenluft verbunden sind und so dafür sorgen, dass die Dämmschicht kontinuierlich austrocknen kann (KOLB und SCHWARZ, 1999). Dieser Aufbau hat im Hinblick auf die Tragfähigkeit des Daches Nachteile, da die obere Schale meist weniger belastbar ist. Daher muss im Einzelfall geprüft werden, in welchem Maße Begrünungen möglich sind (FLL, 2018).

Umkehrdächer grenzen sich durch die Lage der Wärmedämmung, von den anderen Dachkonstruktionen ab. Bei dieser Form des Daches liegt die Wärmedämmung oberhalb der Dachabdichtung (FLL, 2018). Die hierfür verwendeten Wärmedämmstoffe dürfen kein Wasser aufnehmen und müssen diffusionsoffen nach oben gebaut werden. Dadurch kann Wasser, welches durch die Fugen an den Rändern der Wärmedämmungsbausteinen eindringt, wieder restlos verdunsten (KOLB und SCHWARZ, 1999). Dies kann mit grobkörnigen Substraten für die Drän- und Vegetationstragschicht erreicht werden, im Umkehrschluss bedeutet das jedoch auch, dass auf einem solchen Gründach nur Pflanzen verwendet werden können, die relativ trockenresistent sind, da aufgrund der Grobkörnigkeit nur eine geringe Wasserspeicherkapazität gegeben ist (KOLB und SCHWARZ, 1999).

2.3 Vorgänge zur Abflussbildung auf dem Gründach

Bei einem Gründach gibt es prinzipiell zwei verschiedene Wege, wie das Niederschlagswasser zum Abfluss zu kommen. Es kann entweder in den Schichtaufbau infiltrieren und anschließend in den Kanal gelangen oder es fließt oberirdisch in einen Ablauf. Es laufen dabei mehrere Abflussprozesse ab (BAUMGARTNER und LIEBSCHER, 1996).

Den ersten Prozess hierbei stellt der oberflächige Rückhalt von Wasser auf Vegetation und Bodenoberfläche in Form von Interzeption dar. Hierbei wird die Menge des Niederschlagswassers reduziert und ein Teil des zurückgehaltenen Wassers verdunstet. Sobald das Niederschlagswasser die Oberfläche erreicht hat, beginnt es unter Einfluss der Schwerkraft in die Bodenmatrix einzudringen (BAUMGARTNER und LIEBSCHER, 1996). Hierbei ist die Struktur des Bodens entscheidend. Die Oberfläche eines Bodens verfügt über Mikro- und Makroporen. Wenn Makroporen bis zur Bodenoberfläche reichen, kann Niederschlagswasser schnell in tiefe Bereiche des Schichtaufbaus gelangen und wird so schneller von der Oberfläche abgeleitet, bevor es zu einem Oberflächenabfluss kommt (BAUMGARTNER und LIEBSCHER, 1996). Wenn die Intensität des Regens größer ist, als die Infiltrationsrate der Vegetationstragschicht, kommt es zu einem Wasserstau auf der Oberfläche. Infolge dessen kommt es zu einem oberirdischem abfließen von Regenwasser. Dies stellt aber kein Problem dar, solange es zu keiner Oberflächenerosion kommt (FLL, 2018).

LIESECKE (1998), MENDEL (1985) und KOLB (2002) haben in Versuchen herausgefunden, dass die größte Abflussspende von begrünten Dächern nach dem Ende eines Regenereignisses maximal wird und danach wieder abnimmt. Dies führt dazu, dass die Abflussspitzen von Gründächern nicht mit den Abflussspitzen von anderen befestigten Flächen zusammentreffen, die bereits früher ihre Abflussspitze ableiten. Die Abflussscheitel werden mit einer Verzögerung von bis zu 30 Minuten abgeleitet (CARTER, 2006; SIMMONS et al., 2008). Dadurch kommt es zu deutlichen Entlastungen des Kanalsystems.

2.4 Individuelle Vorteile und Nachteile für den Bauherren

Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile für den Bauherren aufgeführt, die ein begrüntes Dach mit sich bringt.

Verlängerte Lebensdauer der Dachabdichtung

Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) untersucht regelmäßig Nutzungsdauern für verschiedene Bauteile eines Gebäudes. Diese bilden die Grundlage für Lebenszykluskosten Berechnungen. In der folgenden Tabelle ist dargestellt, wie sich unterschiedliche Dachabdichtungen und Dachbegrünungen auf die Lebensdauer des Daches auswirken.

Code Nr.	KG - 2. Ebene	KG - 3. Ebene	Bauteil / Material	a	Ersatz in 50a
	360 Dächer	363 Dachbeläge	Flachdachabdichtung		
363.111			Abdichtungsbahnen: Elastomerbahnen, Kunststoffbahnen unterhalb der Dämmung	40	1
363.112			Abdichtungsbahnen: Bitumenbahnen unterhalb der Dämmung	30	1
363.113			Abdichtungsbahnen: Bitumenbahnen, Elastomerbahnen, Kunststoffbahnen oberhalb Dämmung mit schwerer Schutzschicht	30	1
363.114			Abdichtungsbahnen: Bitumenbahnen, Elastomerbahnen, Kunststoffbahnen oberhalb Dämmung mit leichter Schutzschicht	20	2
363.211			Abdichtmassen: Asphaltmastix, Flüssigabdichtung, Gussasphalt unterhalb der Dämmung	40	1
363.212			Abdichtmassen: Asphaltmastix, Flüssigabdichtung, Gussasphalt oberhalb Dämmung mit schwerer Schutzschicht	30	1
363.213			Abdichtmassen: Asphaltmastix, Flüssigabdichtung, Gussasphalt oberhalb Dämmung mit leichter Schutzschicht	20	2
363.214			Abdichtmassen: Flüssigabdichtung oberhalb Dämmung ohne Schutzschicht	20	2
363.311			Schwere Schutzschicht: Extensive Begrünung	40	1
363.312			Schwere Schutzschicht: Bekiesung, Verlegeplatten, Intensive Begrünung	30	1
363.313			Leichte Schutzschicht: Besplitterung vor Ort, werkseitige Bestreuung	15	3
363.411			Beschichtungen: Metallanstrich	12	4

Abbildung 2 Nutzungsdauer von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (modifiziert nach BBSR, 2011)

Hervorzuheben in dieser Tabelle ist, dass extensive Dachbegrünungen als schwere Schutzschicht aufgeführt sind, die die Lebensdauer einer Dachabdichtung von ca. 20 Jahren auf 40 Jahren verdoppeln.

Die längere Lebensdauer der Dachabdichtung wird dadurch erreicht, dass die Temperaturverläufe im Jahres- und Tagesgang durch die darüber liegende Dachbegrünung wesentlich abgepuffert wird (KOLB, 2016).

Wenn große Temperaturänderungen die Dachabdichtung direkt erreichen können, führt dies zu extremen Belastungen aufgrund von Dehnungs- und Stauchungseffekten, dies ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Dadurch wird die Lebensdauer einer Dachabdichtung deutlich verringert (KOLB, 2016).

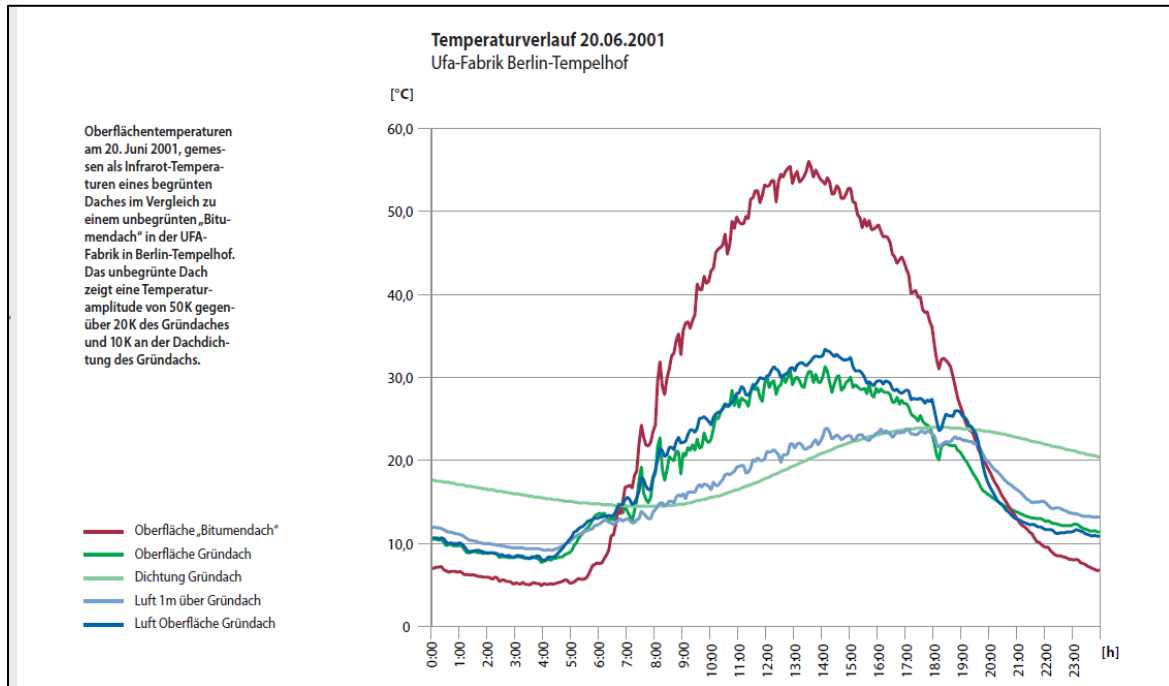


Abbildung 3 Oberflächentemperaturen im Tagesgang einer konventionellen Dachfläche und einer extensiven Dachbegrünung (nach SENATSV ERWALTUNG BERLIN, 2010)

Im obenstehenden Diagramm sind beispielhaft die Temperaturverläufe sowohl eines begrünten als auch eines unbegrünten Daches an einem Sommertag dargestellt. Während das Bitumendach im Tagesverlauf Temperaturen von 55°C erreicht, bleibt die Oberfläche des Gründaches mit ca. 30°C deutlich kühler. Dadurch wird die Temperaturamplitude, die über den Tag hinweg an der Dachabdichtung austritt deutlich abgemildert, sodass hier im Tagesverlauf lediglich eine Schwankung von ca. 10°C auftritt (hellgrüne Linie). Im Vergleich dazu schwankt die Temperatur des unbegrünten Daches um fast 50°C. Die Schutzfunktion der Dachbegrünung kann daher als erheblich wirksam beschrieben werden, welches die Nutzungsdauer der Bauteile deutlich erhöht (KOLB, 2016).

Energieverbrauchssenkung

Wie im vorhergehenden Abschnitt bereits beschrieben, reduziert die Dachbegrünung die Temperatureinwirkung auf die Dachfläche deutlich (MATZINGER, et al., 2017).

In den Wintermonaten leisten Dachbegrünungen einen Beitrag, um Heizenergie zu sparen, dies beruht auf der Pufferwirkung durch Luftschichten und Lufteinschlüsse innerhalb der Dachbegrünung (KOLB, 2016). KOLB (2016) ermittelte ein Heizöleinsparpotential von extensiven Dachbegrünungen, welches im Bereich von 1 bis 2 l/m² Heizöl pro Jahr liegt, dies entspricht einer zusätzlichen Wärmedämmung von 1 cm dicke.

Die im Sommer auftretenden Energieeinsparungen bei der Klimaanlage, können pro 0,5°C weniger eingestrahelter Energie mit einem um bis zu 8 % geringeren Energieverbrauch quantifiziert werden (DUNNET und KINGSBURY, 2004). Der Effekt der Gebäudekühlung durch die Dachbegrünung wird dabei neben der Verschattung der Gebäudeoberfläche durch die Dachbegrünung auch von der in Gründächern zurückgehaltenen Niederschlagsmenge erreicht (GUNTER, 2013). Im Jahresmittel werden 50 bis 90 % der Niederschlagsmengen zurückgehalten, dieses Niederschlagswasser verdunstet mit einem Energieverbrauch von 2670 kJ/m³ (GUNTER, 2013). Nach ZINZI und AGNOLI (2012) können 10 bis 14 % an Energie im Sommer eingespart werden.

Aus den Energieeinsparmöglichkeiten, die im Sommer und Winter auftreten, lässt sich ableiten, dass zusätzlich auch die im Gebäude verbaute Haustechnik kleiner dimensioniert werden kann. Dadurch werden Dachbegrünung noch wirtschaftlicher (KUTTLER, 2011).

Kosteneinsparungen aufgrund der gesplitteten Abwassergebühr

Ein Gerichtsurteil des OVG Münster zur Berechnung der Abwassergebühr, kam zum Schluss, dass der Trinkwasserverbrauch keine geeignete Größe darstellt, um die eingeleitete Niederschlagswassermenge von dem betreffenden Grundstück in das Kanalsystem zu berechnen. Daher ist von den Kommunen eine gesplittete Abwassergebühr einzuführen. (OVG Münster 9 A 3648/04, 2010).

Da extensive Dachbegrünungen das Potential haben, beträchtliche Wassermengen im Jahresmittel zurückhalten, wird in einigen Städten eine Verringerung des Niederschlagentgeltes als Anreiz zur Bauwerksbegrünung angeboten.

In einer Umfrage der Fachvereinigung Bauwerksbegrünung aus den Jahren 2016 und 2017 an Städte mit mehr als 10.000 Einwohner kam heraus, dass in 336 Städten bereits eine gesplittete Abwassersatzung besteht (FBB, 2017b). Die Höhe der möglichen Einsparungen für den Besitzer einer Immobilie liegen dabei in einem Schwankungsbereich zwischen 30 bis 90 % bezogen auf das jährliche Niederschlagswasserentgelt pro Quadratmeter.

Ästhetik und Wertsteigerung der Immobilie

Nach BIANCHINI und HEWAGE (2012) können extensive Dachbegrünungen zu einer Wertsteigerung des Gebäudes zwischen 2 bis 5 % führen. Dies ist vor allem in dicht besiedelten Städten mit hohen Immobilienpreisen interessant, da sich dadurch der Wert einer Immobilie beträchtlich steigern lässt.

Eine Studie von GRAHN und STIGSDOTTER (2003) ergab, dass je kürzer die Entfernung vom Wohnort zur nächsten Grünfläche ist, desto weniger Stress von den Einwohnern subjektiv erlebt wird. Dieser Effekt wird schon durch indirektes Naturerleben ausgelöst, wenn zum Beispiel eine begrünte Dachfläche vom Arbeitsplatz gesehen werden kann. Dies hat einen positiven Einfluss auf die seelische Gesundheit (PRETTY, 2004).

Höhere Investitionskosten

Die Mehrkosten, die eine extensive Dachbegrünung bei der Realisation verursachen, entstehen, neben den Kosten der Dachbegrünung, durch den erhöhten Aufwand an Statik.

Die Mehrkosten für die Statik belaufen sich auf etwa 3 bis 4 €/m² (DICKHAUT et al., 2017). Die Herstellungskosten der extensiven Dachbegrünung ist von vielen Faktoren abhängig und liegt in einem Bereich zwischen 25 bis 35 €/m² (BUGG, 2019).

Insgesamt belaufen sich die Herstellungskosten einer extensiven Dachbegrünung auf ca. 1,3 % der gesamten Bauwerkskosten von Gebäuden, dieser Wert sinkt mit wachsender Anzahl an Geschossen (DICKHAUT et al., 2017).

Pflege und Wartungsarbeiten

Bei Extensivbegrünungen fallen laut FLL-Dachbegrünungsrichtlinie 2 bis 4 Pflegegänge pro Jahr an, bei denen folgende Leistungen erforderlich werden (FLL, 2018):

- Versorgung mit Nährstoffen
- Bewässerung stärker geneigter sonnenexponierter Dachflächen
- Entfernen von Fremdwuchs
- Nachsaat bei Lücken in der Vegetation
- Nachfüllen von Substrat bei Erosion
- Freihalten von technischen Einrichtungen von Bewuchs

Neben den Pflegearbeiten sind auch die technischen Anlagen während der Pflegegänge zu warten. Dabei sollten nach FLL-Dachbegrünungsrichtlinie (2018) die Funktionsfähigkeit der Dachabläufe und der technischen Be- und Entwässerungseinrichtungen kontrolliert werden, Verunreinigungen und Ablagerungen in Kontrollschächten, Dachabläufen und Entwässerungsrinnen beseitigt werden und bei stärker geneigten Dächern die Einrichtungen zur Schubsicherung kontrolliert werden.

Diese Pflege- und Wartungsgänge verursachen Kosten in Höhe von etwa 0,65 €/m²*a, während konventionelle Dächer mit 0,25 €/m²*a angesetzt werden können (ZinCo, 2019).

2.5 Gemeinnützige Vorteile

Neben den Individuellen Vor- und Nachteilen gibt es auch Vorteile, die Einfluss auf das gesamte Stadtgebiet haben. Diese Effekte werden stärker, je mehr Dächer begrünt sind.

Regenwassermanagementverbesserung

„Kommunen errichten zunehmend Regenwasserinfrastrukturen, die teuer und pflegeintensiv sind, da durch den Klimawandel stärkere Regenereignisse stattfinden.“ (ROEHR und FASSMAN-BECK, 2016). Um städtische Gebiete zukünftig besser an die Folgen des Klimawandels anzupassen bietet sich die Verwendung von dezentralen Regenwasserinfrastrukturen an, so können u.a. Gründächer großflächig in Urbanen Gebieten eingesetzt werden, um die bestehenden Anlagen der Regenwasserbewirtschaftung wie Kanäle oder Regenrückhaltebecken zu entlasten (PALMARICCIOTTI, 2015). KOLB (1987b) fand bei Versuchen zur Ermittlung des Spitzenabflussbeiwertes von Gründächern heraus, dass Gründächer selbst im wassergesättigten Zustand die Abflussspitze um 50 bis 60 % reduzieren können. Da aber nicht davon auszugehen ist, dass die Dachbegrünung permanent wassergesättigt ist, da sie kontinuierlich Wasser in Form von Verdunstung verliert, stellte er fest, dass die bereits von SCHACHT (1981) und MENDEL (1985) berechneten Abflussminderungen von 70 % durchaus für extensive Dachbegrünungen im Kontext der Stadtentwässerungsplanung angesetzt werden können (KOLB, 1987b). Dadurch würde sich das abzuleitende Wasservolumen deutlich reduzieren, wodurch Regenrückhaltebecken oder Kanäle kleiner dimensioniert werden können (.

Neben der reinen Ableitung des Regenwassers spielen in Städten mit einem Mischsystem zur Entwässerung auch die Kosten für die Beseitigung des Oberflächenwassers eine große Rolle, da der Oberflächenabfluss das 60 bis 200-fache des Schmutzwassers darstellen kann (BRETTSCHNEIDER, 1982). Dieser große Wasseranfall führt bei Bau und Betrieb der Kläreinrichtungen zu erheblichen Mehrkosten, welche über die Abwassergebühren auf die Einwohner umgelegt werden (KOLB, 1987b). 1986 berechneten ERNST und WEIGERDING durch großflächigen Einsatz von Dachbegrünungen der Stadt München ein Kosteneinsparpotential der Kläreinrichtungen von 20 bis 56 % bezogen auf Bau und Betrieb.

Entgegenwirkung der Urbanen Sturzfluten

Urbane Sturzfluten sind nach DWA-M 119 (2016) wie folgt definiert:

„kurzfristig auftretende, große oder sehr große Oberflächenabflüsse innerhalb eines Siedlungsgebiets aufgrund lokal auftretender Starkregen“

Im Zuge des Klimawandels wird das Phänomen der Urbanen Sturzfluten immer häufiger auftreten (DWA-M 119, 2016). Dies stellt ein großes Problem dar, da nicht vorhersagbar ist, wann, wo und welche Schäden durch ein Extremereignis hervorgerufen werden (BUCHER, 2017).

Die Entwässerungseinrichtungen der Kommunen sind aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht auf Extremereignisse ausgelegt. Da Städte einen hohen Oberflächenversiegelungsgrad aufweisen und Niederschlagswasser nicht schnell genug in den Boden infiltrieren, verdunsten, bzw. den Entwässerungseinrichtungen zufließen kann, kommt es zu großen Wasserbewegungen an der Oberfläche (DWA LANDESVERBAND BAYERN, 2017). Diese können zu Funktionsbeeinträchtigungen oder Schäden in den Städten führen.

In untenstehenden Abbildungen ist die Problematik des hohen Versiegelungsgrades städtischer Gebiete dargestellt.

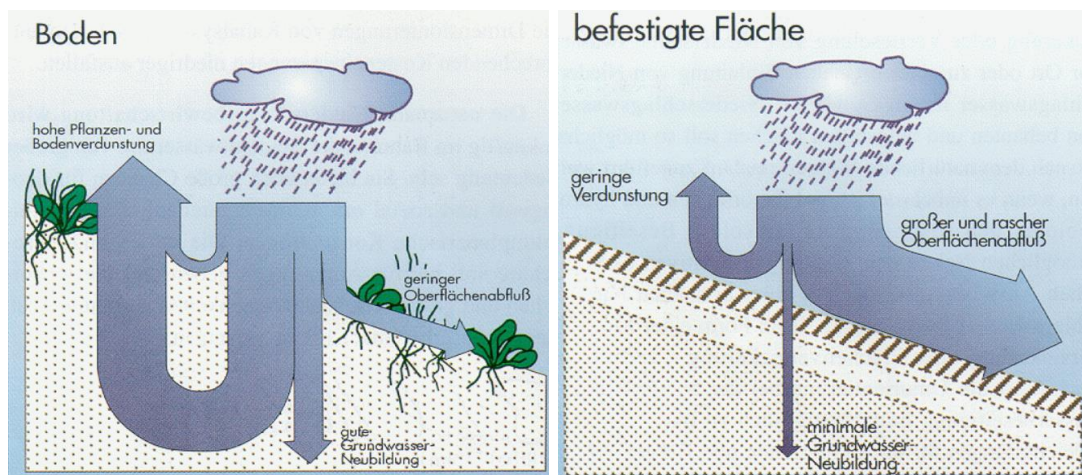


Abbildung 4 Abflussregime natürlicher Boden (LFU Bayern, JAHR)

Abbildung 5 Abflussregime befestigte Fläche (LFU Bayern, JAHR)

In beiden Abbildungen ist erkennbar, dass der Anteil des Niederschlagswassers, der oberirdisch abfließt in besonderem Maße davon abhängig ist, welchen Versiegelungsgrad die Oberfläche aufweist.

Dachbegrünungen können durch die Reduzierung der befestigten (Dach-)Flächen dazu beitragen die bei Starkregen auftretenden Oberflächenabflüsse zu verringern.

Entgegenwirkung der Urban Heat Islands

In folgender Grafik ist die Problematik der Urban-Heat-Islands bildlich dargestellt, die erhöhte Erwärmung der Städte unter anderem aufgrund verringerter Verdunstung, führt zu einer deutlichen Erhöhung der Umgebungstemperatur (OHLWEIN, 1984)

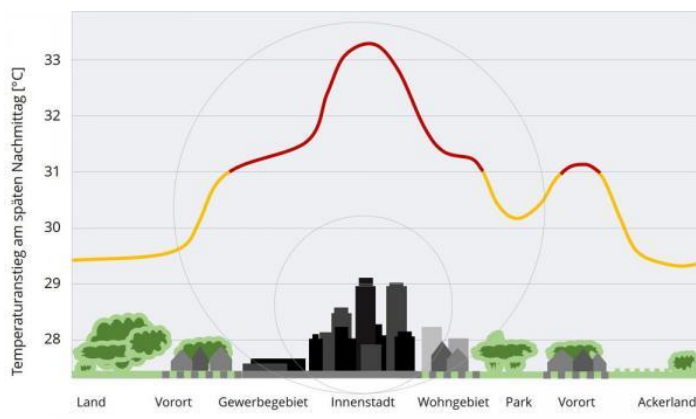


Abbildung 6 Darstellung der Urban Heat Island (nach SCHUSTER, 2015)

Aufgrund der großflächigen Versiegelung gibt es in urbanen Gebieten lediglich einen reduzierten Verdunstungs- und Versickerungsanteil, da große Teile des Niederschlags sehr schnell abgeleitet werden, dies führt zu einem gestörten Wasserkreislauf (SENATSVERWALTUNG BERLIN, 2010). In der folgenden Abbildung ist dargestellt, wie sich diese einzelnen Komponenten mit steigendem Versiegelungsgrad verhalten.

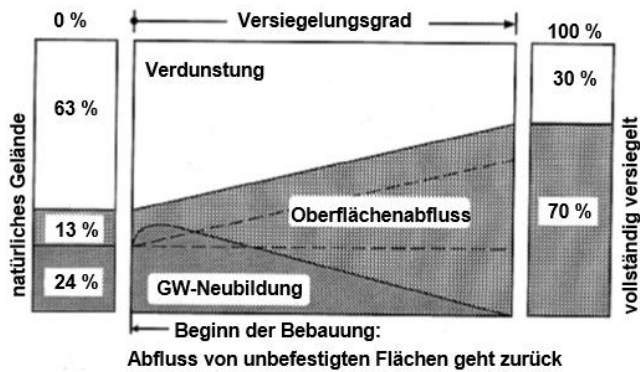


Abbildung 7 Qualitative Änderung der Wasserbilanz einer Siedlung bei zunehmender Bebauung (nach DWA-M 153, 2007)

Dadurch kommt es zu einer erhöhten Aufheizung der Städte, da die einfallende globale Einstrahlung anders umgesetzt wird (SENATSV ERWALTUNG BERLIN, 2010). Auf versiegelten Flächen kann diese nicht als Motor für das Pflanzenwachstum und damit auch nicht für kühlende Verdunstung genutzt werden (ZINCO, 2018). Neben der Sonneneinstrahlung spielen auch die Prozesse des Hausbrandes, der Prozesswärme von industriellen Produktionsanlagen, dem PKW und LKW-Verkehr, der verminderten nächtlichen Abkühlung aufgrund des Rückstrahlungseffektes von Baukörpern, die verminderte Wärmeabstrahlung durch die Dunstglocke über der Stadt und die oft geringe Durchlüftung der Stadtkerne eine wichtige Rolle (OHLWEIN, 1984). Dachbegrünungen bieten die Chance durch Ausgleich der städtischen Flächenversiegelung zumindest teilweise den Effekten der Aufheizung entgegenzuwirken und so für ein angenehmes städtisches Klima zu sorgen (SENATSV ERWALTUNG BERLIN, 2010).

3. Material und Methoden

Nachfolgend werden die im Rahmen dieser Bachelorarbeit verwendeten Materialien und Methoden vorgestellt, die zur Klärung der Aufgabenstellung nötig sind, vorgestellt.

3.1 Beschreibung des Daches und der Messeinrichtungen

Dachaufbau und Zustand

Die der Analyse zu Grunde gelegten Dachflächen gehören zu dem Gebäude der *HTI-Gienger* in Röttenbach im Landkreis Spalt, Bayern.

Beim Bau des Handelskontors wurde darauf geachtet nachhaltige Regenwassermanagementsysteme zu verbauen. Um später Analysen durchzuführen zu können, wurden neben einer konventionellen Dachabdichtung auch Dachbegrünungen verbaut und jeweils mit Messsystemen ausgestattet. Nachfolgend ist das Handelszentrum dargestellt.



Abbildung 8 Luftbildaufnahme der HTI Gienger in Röttenbach (HTI, OJ)

Auf der dargestellten Luftbildaufnahme des Logistikgebäudes der *HTI* sind insgesamt drei verschiedene Dachflächen voneinander abzugrenzen. In der unten stehenden

Abbildung sind die der Analyse zugrunde liegenden Dachflächen in der Luftbildaufnahme voneinander abgehoben.



Abbildung 9 Einteilung der Dachflächen (modifiziert nach HTI, OJ)

Neben der Dachfläche mit einer konventionellen Dachabdichtung, die in obenstehender Abbildung orange eingezeichnet ist, nachfolgend als „Foliendach“ bezeichnet, gibt es noch zwei zusammen 280 m² große, begrünte Flächen. Bei der, auf der Luftaufnahme grün umrandeten Fläche handelt es sich um eine extensive Dachbegrünung, nachfolgend als „Gründach“ bezeichnet. Auf der Luftaufnahme blau eingezeichnete Fläche handelt es sich um eine einfache Intensivbegrünung. Die nachfolgenden Untersuchungen beziehen sich auf das Foliendach und das Gründach. Der Systemaufbau der extensiven Begrünung ist im Anhang unter Kapitel 8.1 in Abbildung 26 dargestellt.

Im Zuge der Kontrolle der Dachflächen auf Haltbarkeit, sollen die extensive Dachbegrünung und die konventionelle Dachabdichtung großflächig kontrolliert werden und bereits aufgetretene Schäden dokumentiert werden.

Lysimeter

Um Auswertungen über das Verhalten der extensiven Dachbegrünung im Vergleich zu einem konventionellen Flachdach herstellen zu können, wurde sowohl auf dem Foliendach als auch auf der Fläche der extensiven Dachbegrünungsfläche je ein Lysimeter der Firma *Umwelt Geräte Technik*, nachfolgend als *UGT* bezeichnet,

verbaut. Diese beiden Lysimeter sind im Anhang unter Kapitel 8.1 Abbildung 27 dargestellt.

Die Lysimeter haben jeweils eine Fläche von 1 m² und sind in der Lage folgende Parameter auf dem Dach zu messen:

- Gewicht Lysimeter Foliendach [kg] (Messbereich: 0 bis 480 kg, Messauflösung: 0,01 kg)
- Gewicht Lysimeter Gründach [kg] (Messbereich: 0 bis 480 kg, Messauflösung: 0,01 kg)
- Abfluss Lysimeter Foliendach [l] (Kippzähler 0,1 l; V_{max}: 5 l/min)
- Abfluss Lysimeter Gründach [l] (Kippzähler 0,1 l; V_{max}: 5 l/min)
- Batterieladestand [V] (Ladezustand in Volt)

Auch die Lysimeter sollen im Rahmen der Zustandserfassung überprüft und auftretende Schäden dokumentiert werden.

Wetterstation

Auf dem Dach des Handelskontors ist eine meteorologische Wetterstation der Firma UGT verbaut, die im Stundentakt folgende Daten generiert:

- Temperatur Luft außen [°C] (Messbereich: -30 bis 120°C; Messgenauigkeit: ±0,2°C)
- Windgeschwindigkeit [m/s] (Messbereich: 0,5 bis 50 m/s; Genauigkeit: ±3 % vom Messwert)
- Luftfeuchtigkeit außen [%] (Messbereich: 0 bis 100 %; Messgenauigkeit: ±2 %)
- Niederschlagsmenge [mm] (Messbereich: 0 bis 8 mm/min; Messauflösung: 0,1 mm)

Die Wetterstation wurde in einem Abstand von jeweils ca. 10 Metern zu den verbauten Lysimetern errichtet, um sicherzustellen, dass die gleichen Wetterverhältnisse für die Lysimeter und die Wetterstation gegeben sind.

Beschreibung der Räumlichkeiten unter den Flächen

Um die Einflüsse der Dachbegrünung auf das Raumklima der unterhalb liegenden Räume untersuchen zu können, wurden unter den zu vergleichenden Dachflächen etwa gleich große, mit Sensoren ausgestattete, Großraumbüros angelegt. Beide Räume bieten für jeweils ca. 20 Mitarbeiter Platz und sind mit den gleichen Heiz- und Kühlelementen ausgestattet. Auf folgender Abbildung ist die Lage der Räume im Gebäude dargestellt.

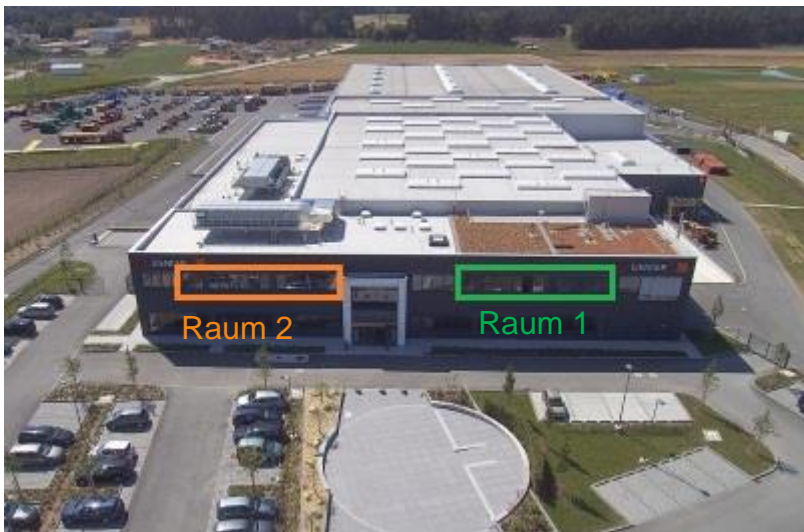


Abbildung 10 Einteilung der Räume unter den Dachflächen (modifiziert nach HTI, OJ)

Die Sensoren in den Räumlichkeiten können folgende Messdaten aufnehmen:

- Lufttemperatur Raum 1 [°C] (Messbereich: 0 bis 60°C; Messgenauigkeit: $\pm 0,3$ K)
- Lufttemperatur Raum 2 [°C] (Messbereich: 0 bis 60°C; Messgenauigkeit: $\pm 0,3$ K)
- Luftfeuchtigkeit Raum 1 [%] (Messbereich: 0 bis 100 % rel. Feuchte; Messgenauigkeit: ± 3 % rel. Feuchte)
- Luftfeuchtigkeit Raum 2 [%] (Messbereich: 0 bis 100 % rel. Feuchte; Messgenauigkeit: ± 3 % rel. Feuchte)

Datenzugang

Alle oben beschriebenen Daten werden im Takt von einer Stunde aufgezeichnet und anschließend in der online Datenbank *SVADSS* der Betreiberfirma *UGT* zur Verfügung gestellt. In diesem Online Auftritt können fünf verschiedene Messdaten gleichzeitig in Ihrem zeitlichen Verlauf betrachtet werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Rohdaten seit Beginn der fehlerfreien Messungen am 13.02.2017 herunterzuladen. Nachfolgend werden die verschiedenen verwendeten Analysemethoden vorgestellt, die sich alle auf die in *SVADSS* verfügbaren Daten beziehen.

3.2 Methodik Niederschlags-Abfluss-Verhältnisse

3.2.1 Jahresabflussbeiwert ψ_a / Jahreszeitlicher Abflussbeiwert

Abflussbeiwerte geben an, welcher Anteil des Niederschlagswassers abflusswirksam wird und den Entwässerungseinrichtungen zufließt. Der Jahresabflussbeiwert ψ_a beschreibt das Verhältnis zwischen Abfluss und dem gefallenem Niederschlagswasser innerhalb eines Jahres, der restliche Anteil verdunstet.

Um dies differenzierter betrachten zu können, sollen jahreszeitliche Abflussbeiwerte ermittelt werden, die den Anteil des zum Abfluss kommenden Niederschlagswassers der jeweiligen Jahreszeit angeben. Für die jahreszeitlichen Abflussbeiwertsbetrachtungen wird das Jahr in vier Abschnitte gegliedert. Dafür werden die astronomischen Jahreszeiten herangezogen. Diese beschreiben den Stand der Erde zur Sonne und damit das vorherrschende Wettergeschehen objektiver als die meteorologische Einteilung der Jahreszeiten.

Für die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden die Jahreszeiten wie folgt definiert:

Tabelle 1 Einteilung der Jahreszeiten

Jahreszeit	Beginn	Ende
Frühling	20.03	20.06
Sommer	21.06	22.09
Herbst	23.09	20.12
Winter	21.12	19.03

Um den Jahresabflussbeiwert zu ermitteln wird das gesamt abgelaufene Wasser in Relation zur Menge an gefallenem Niederschlag gesetzt.

Um die jahreszeitlichen Abflussbeiwerte zu ermitteln, wird die oben beschriebene Vorgehensweise auf die einzelnen Jahreszeiten bezogen angewendet.

3.2.2 Ermittlung der Wasserspeicherkapazität und Wassersättigung

Um vom jeweils aktuellen Gewicht des Gründachlysimeters auf die Sättigung der Dachbegrünung mit Wasser schließen zu können, ist es entscheidend die Wasserspeicherkapazität der Dachbegrünung zu kennen.

Die Wasserspeicherkapazität des Bodens gibt an, wieviel Wasser in l/m^3 entgegen der Schwerkraft vom Boden gehalten werden kann. Hierbei sind Porenverhältnisse, Saugspannung und der Pflanzenverfügbare Anteil Wasser entscheidend.

Die Wassersättigung gibt an, wie hoch der Anteil von Wasser im Gründachlysimeter bezogen auf die Wasserspeicherkapazität zu einem bestimmten Zeitpunkt in Prozent ist.

Die Wasserspeicherkapazität soll aus der Differenz zwischen den Gewichten der wassergesättigten Dachbegrünung und der trockenen Dachbegrünung ermittelt werden. Die Wasserspeicherkapazität soll in der Einheit l/m^2 berechnet werden

Um das Gewicht der Dachbegrünung bei Vollsättigung möglichst genau bestimmen zu können, sind Vorüberlegungen notwendig. In den FLL DACHBEGRÜNUGNSRICHTLINIEN (2018) wird ein Verfahren zur Ermittlung der maximalen Wasserspeicherkapazität beschrieben:

„Die maximale Wasserkapazität dient der Bestimmung der Wasserspeicherfähigkeit der im Schichtaufbau eingesetzten Stoffe im verdichteten Zustand. Die maximale Wasserkapazität gibt den Wassergehalt eines Stoffes nach vorlaufender Wassersättigung und anschließendem zweistündigen abtropfen lassen an [...].“

Dieses beschriebene Verfahren soll leicht modifiziert auf die vorhandenen Daten angewandt werden. Das Substrat der Vegetationstragschicht kann das Wasser solange halten, bis die Sättigung 100 % erreicht hat. Alles Wasser, was nach dem Erreichen der Vollsättigung auf die Dachbegrünung trifft, wird ohne große Verzögerung abgeleitet (STOVIN et al., 2015).

In der Abbildung Nr. 32 im Anhang unter Kapitel 8.2.2 ist dargestellt, dass Abflüsse vom Gründach i.d.R. erst nach Erreichen der 100 % Wassersättigung stattfinden. Sobald das Gründach angefangen hat Wasser abzugeben, sind erst keine messbaren Abflüsse zu verzeichnen, nachdem der Wasseranteil in der Begrünung auf den berechneten Wert bei 100 % Sättigung zurückfällt.

Auf Basis dieses Vorgehens sind zur Ermittlung des Vollsättigungsgewichtes alle Regenereignisse aus der Datenbank herauszusuchen, bei denen ein Abfluss vom Gründachlysimeter festzustellen war. Dadurch ist sichergestellt, dass eine Vollsättigung des Substrates stattfand. Da es bei Regenereignissen mit hoher Intensität schon vor dem Erreichen der Vollsättigung zu Abflüssen kommen kann, soll zusätzlich die Bedingung eines zu erreichenden Mindestgewichtes eingehalten werden, um geeignet für die Auswertung zu sein.

In Analogie zu dem in den Dachbegrünungsrichtlinien (FLL, 2018) beschriebenen Verfahren, wird derjenige Wert für das Vollsättigungsgewicht herangezogen, den die Dachbegrünung in der Stunde nach dem der letzte Abfluss von der Begrünung festgestellt werden konnte aufweist.

In Tabelle 23 im Anhang in Kapitel 8.2.2, kann das Vorgehen nachvollzogen werden. Der erste Messwert des Gewichts des Gründachlysimeters nach dem „austropfen“ (grün) wird für das weitere Vorgehen herangezogen.

Um einen möglichst aussagekräftigen Wert zu erhalten, werden im nächsten Schritt die so gewonnenen Werte für das Gewicht bei Vollsättigung aller Regenereignisse, die die Bedingungen erfüllen gemittelt.

Das Gewicht des Gründachlysimeters bei absoluter Trockenheit ist schwieriger zu ermitteln, da im vorhandenen Datenmaterial keine ausreichend langen Trockenperioden und damit Gewichtskonstanz der Dachbegrünung, festzustellen war.

Die längste Trockenperiode ereignete sich im Sommer 2018 und dauerte ca. 41 Tage. Diese Trockenperiode soll „künstlich“ mithilfe einer Trendlinie in Excel verlängert werden, um das Gewicht des Lysimeters bei 0% Wassersättigung abschätzen zu können.

Um das erhaltene Ergebnis validieren zu können, soll der Wert anschließend mit den Herstellerangaben von *ZinCo* für die Vegetationstragschicht „*Steinrosenflur*“ abgeglichen werden.

Nachdem die beiden Hüllwerte ermittelt wurden, kann aus der Differenz die Wasserspeicherkapazität berechnet werden.

Um nun die aktuell vorherrschende Wassersättigung zu einem beliebigen Zeitpunkt ermitteln zu können, ist vom Gewicht des Gründachlysimeters das Trockengewicht des Lysimeters abzuziehen. Dieses Ergebnis ist anschließend durch den Wert der Wasserspeicherkapazität zu dividieren. Das Ergebnis ist die Wassersättigung in Prozent in Abhängigkeit vom jeweiligen Gewicht des Gründachlysimeters.

3.2.3 Ermittlung der mittleren Wassersättigung

Die Wasserrückhaltefähigkeit von Dachbegrünungen hängt stark von der vorherrschenden Wassersättigung ab.

Um diese Wasserrückhaltefähigkeit zu quantifizieren ist die mittlere Wassersättigung der Dachbegrünung von Bedeutung.

Diese soll sowohl für das ganze Jahr ermittelt werden als auch separat für die einzelnen Jahreszeiten nach oben beschriebenem Beispiel.

Da bekannt ist, wie hoch die Wassersättigung in Abhängigkeit vom jeweiligen Gewicht des Gründachs ist, kann so sowohl für das ganze Jahr als auch die Jahreszeiten die jeweilige mittlere vorherrschende Wassersättigung ermittelt werden.

Bei der Berechnung der mittleren Wassersättigung ist es wichtig, das darauf geachtet wird, dass Zeiten, in denen das Dach schneebedeckt ist, aus den Berechnungen außenvor gelassen werden, um das Ergebnis nicht zu verfälschen.

3.2.4 Ermittlung der Abflussbeiwerte C_s und C_m

Abflussbeiwerte gehören zu den wichtigsten Planungs- und Bemessungsgrößen, die in der Siedlungswasserwirtschaft verwendet werden. Von Ihrer Genauigkeit hängt in entscheidendem Maße die Dimensionierung von Wasserbauwerken ab. Eine Überschätzung der Größenordnung der Abflussbeiwerte kann zu erheblichen Mehrkosten führen, eine Unterschätzung zu erhöhtem Risiko des Unterdimensionierens von Wasserbaulichen Anlagen (DWA-A 531, 2017).

Spitzenabflussbeiwert C_s für Gründach und Foliendach

Für die Ermittlung von Spitzenabflussbeiwerten ist entscheidend wichtig, welcher Regen verwendet wird. In der Literatur werden verschiedene Bemessungsregen zur Ermittlung von C_s von Gründächern beschrieben. Diese sind nach vorlaufender aufbausättigender Berechnung und anschließendem 24-stündigem abtropfen anzuwenden (FLL, 2018). Die zu verwendende Blockregenspende $r_{(15)}$ liegt hierfür i.d.R. bei 300 l/(s*ha) (u.a. KOLB (1999, 2002), LIESECKE (1988), FLL (2018)).

Da die Datenaufnahme der Messdaten nur im ein Stundentakt stattfindet, ist es somit nicht möglich Abflussbeiwerte für Regen bestimmter Dauer oder Intensität zu beziehen. Es können keine Niederschlagsspenden in l/(s*ha) gebildet werden, da nicht klar ist, in welchem Zeitraum der registrierte Niederschlag gefallen ist. Dies würde dazu führen, dass z.B. ein Regen der eigentlich 20 Minuten gedauert hat und

bei dem 15 l/m² Niederschlag gefallen sind statt der eigentlichen Regenspende von 125 l/(s*ha) eine Regenspende von 41,67 l/(s*ha) aufweisen würde.

Das gleiche Problem tritt bei der Betrachtung des Abflusses von den Lysimetern auf, da nicht klar ist, wann und mit welcher Intensität der Abflussscheitel auftrat. Dies wird zu Verzerrungen bei der Berechnung des Spitzenabflussbeiwertes führen.

Daher soll im Rahmen der nachfolgenden Ausarbeitungen versucht werden Abflussbeiwerte zu ermitteln, die nicht direkt von der Regenspende der Regenereignisse abhängig sind.

Definition Spitzenabflussbeiwert nach DWA-A 118 (2006):

Verhältnis aus maximaler Niederschlagsabflusssspende zu zugehöriger maximaler Regenspende.

Dies ist in folgender Abbildung verdeutlicht.

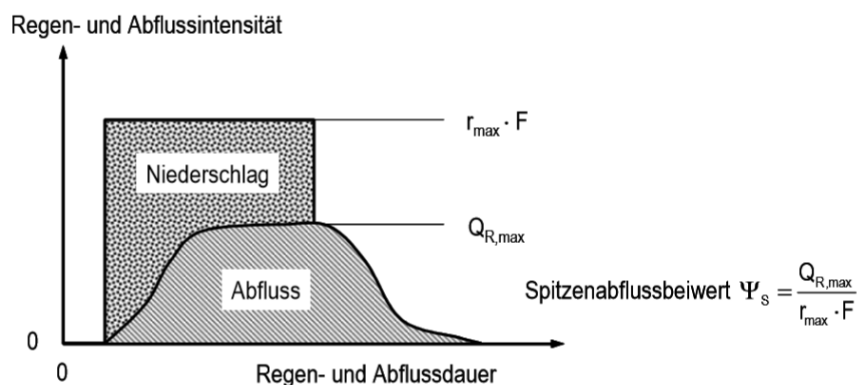


Abbildung 11 Definition des Spitzenabflussbeiwertes Ψ_s bzw. ψ_s (nach GUJER, 2006)

Der Spitzenabflussbeiwert der extensiven Dachbegrünung soll auf Basis von Starkregen ermittelt werden. Diese werden mit Niederschlagsmenge größer 10 l/h definiert. Daraus ergeben sich mögliche Regenspenden zwischen 333 l/(s*ha) was 10 Liter Regen gefallen in 5 Minuten entspricht, bis hin zu Regenspenden von 27,8 l/(s*ha), entsprechend 10 Liter Regen gefallen in 60 Minuten.

Eine genauere Auswertung mit ermittlungsrelevanten Bemessungsregenspenden ist aufgrund der o.g. Gründe nicht möglich.

Der Spitzenabflussbeiwert des Foliendachs soll ebenfalls ermittelt werden. Hierfür werden alle Spitzenabflüsse nach geeigneten Regenereignissen untersucht. Als geeignet werden diese eingestuft, wenn es zu einem messbaren Abfluss kam. Nicht geeignet sind unter anderem Regenereignisse in den Wintermonaten, wo Regen auf eine geschlossene Schneedecke fällt und es so zu keinem Abfluss kommt, dies würde die Ergebnisse verfälschen. Aus den geeigneten Regenereignissen soll anschließend ein Wert für den Spitzenabflussbeiwert C_s abgeleitet werden.

Mittlerer Abflussbeiwert C_m für Gründach und Foliendach

Der mittlere Abflussbeiwert wird nach ATV-DVWK-A 198 (2003) definiert als Quotient aus Abflussvolumen und Niederschlagsvolumen für einen definierten Zeitraum. Im Rahmen dieser Analyse bezieht sich der Zeitraum jeweils auf ein abgegrenztes Niederschlagsereignis.

Mittlere Abflussbeiwerte C_m werden anhand von realen Niederschlagsereignissen ermittelt. Hierfür werden Gründächer mit Messsystemen, wie bei *HTI*, ausgestattet. Anschließend werden Regenereignisse aus den Messdaten herausgesucht, die eine bestimmte Niederschlagsmenge erreicht haben. Diese Grenze liegt meist zwischen 0 bis 5 mm Niederschlag (u.a. STOVIN, 2012; UHL, 2008).

Im Rahmen dieser Arbeit soll der mittlere Abflussbeiwert zum einen aus dem bereits berechneten Jahresabflussbeiwert abgeleitet werden. Ein Abflussbeiwert auf dessen Basis entspricht der Auswertung aller Regenereignisse ab 0 mm Niederschlag.

Zum anderen soll der Abflussbeiwert ermittelt werden, indem alle Regenereignisse betrachtet werden, bei denen es zu einem Abfluss vom Gründach kam.

Der mittlere Abflussbeiwert für das Foliendach soll ermittelt werden, indem alle Regenereignisse betrachtet werden, bei denen es zu einem messbaren Abfluss kam.

Ausnahmen bei Abflussbeiwerten

Das Foliendach sollte der Theorie zufolge bei jedem Regenereignis höhere Abflussbeiwerte als das Gründach aufweisen. Dies soll überprüft werden, indem alle Regenereignisse betrachtet werden. Wenn sich bei bestimmten Regenereignissen herausstellen sollte, dass dieser Zusammenhang zwischen den Abflussbeiwerten nicht gegeben ist, sind diese gesondert zu betrachten.

3.2.5 Schnee Betrachtung

Gründächer werden häufig damit verbunden, dass sie bessere Dämmeigenschaften aufweisen, als konventionelle Dächer.

Dies müsste dazu führen, dass Schnee im Winter länger auf den begrünten Flächen liegen bleiben sollte, als auf der konventionellen Dachfläche.

Da die Wetterstation nicht in der Lage ist Schneefall als Niederschlag aufzuzeichnen. Soll folgendermaßen vorgegangen werden, um den Effekt nachzuweisen. Im ersten Schritt sollen Referenzgewichtswerte für beide Lysimeter erstellt werden. Beim Foliendachlysimeter wird dieses Referenzgewicht ermittelt, indem alle Gewichtswerte dieses Lysimeters gemittelt werden (ohne Schneeereignisse). Beim Gründachlysimeter entspricht der Referenzwert dem Gewicht bei 100 % Wassersättigung. Bei der Betrachtung der Datenbank kann nun ermittelt werden, wann sicher Schnee auf einem der beiden Dachflächen gelegen haben muss. Durch Beobachtung der Gewichtsänderung der beiden Lysimeter lässt sich feststellen, wie lange Schnee lag, indem betrachtet wird, wann das Gewicht der Lysimeter wieder den Referenzwert erreicht hat.

3.3 Methodik Raumklima

Raum 1 liegt „geschützt“ unter der Dachbegrünung, Raum 2 hat als Dachsystem ein konventionelles Flachdach. Bei der Suche nach Unterschieden zwischen den beiden Räumen, die von der Dachbegrünung herkommen könnten, stellt sich die Frage, ob es Unterschiede im Raumklima zwischen beiden Räumen gibt. Nachfolgend werden die anzuwendenden Methoden beschrieben, um dies zu untersuchen.

3.3.1 Temperaturzusammenhänge

Um aus den Temperaturwerten der beiden Räume sinnvolle Beziehungen herstellen zu können, sind grundlegend ein paar Annahmen festzusetzen.

Die Temperatur eines Raumes ist abhängig davon, wie viele Personen sich in diesem aufhalten. Da beide Räume eine ähnliche Größe und annähernd gleich viele Arbeitsplätze aufweisen, wird davon ausgegangen, dass der Faktor der menschlichen Erwärmung in beiden Räumen gleich hoch ist und damit nicht näher betrachtet werden muss. Zudem wird angenommen, dass in beiden Räumen Klima- und Heizungsanlagen mit gleicher Leistungsfähigkeit verbaut sind.

Für die Berechnungen wird das Jahr wieder in vier Jahreszeiten eingeteilt.

Im ersten Schritt wird für jede Jahreszeit das arithmetische Mittel der Raumtemperaturen berechnet. Wenn ein signifikanter Unterschied zwischen den arithmetischen Mitteln der beiden Raumtemperaturen einer Jahreszeit in einem Jahr vorliegt, ist davon auszugehen, dass ein Effekt durch die Dachbegrünung induziert wird.

Um dies auf statistische Signifikanz prüfen zu können, wird anschließend die Standardabweichung des arithmetischen Mittels der Raumtemperatur für die einzelnen Räume in den jeweiligen Jahreszeiten berechnet.

Das Vorgehen zur Ermittlung der Standardabweichung wird nun kurz vorgestellt (PAPULA, 2011).

1. Berechnung des arithmetischen Mittels \bar{x}

$$\bar{x} = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots) \div n$$

2. Berechnung der Varianz s^2

$$s^2 = [(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2 + \dots]$$

3. Berechnung der Standardabweichung s

$$s = \sqrt{s^2}$$

Um zu überprüfen ob etwaige Unterschiede signifikant sind, soll eine statistische Prüfung stattfinden. Diese Prüfung soll mit dem T-Test vollzogen werden. Hierfür sollen jeweils die Studententemperaturwerte der beiden Räume der einzelnen Jahreszeiten miteinander verglichen werden.

Der T-Test ist ein Hypothesentest. Er wird verwendet, um zu prüfen, ob sich zwei Datenreihen statistisch signifikant unterscheiden, oder ob die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sie denselben Ursprung haben (\rightarrow kein Effekt) höher ist. Im konkreten Fall dieser Ausarbeitung würde ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen beiden Räumen den Schluss zulassen, dass die Dachbegrünung das Raumklima in Raum 1 so sehr verändert, dass die Temperaturänderungen sich nicht gleich verhalten. Wenn herauskommen sollte, dass etwaige Unterschiede der Raumtemperaturen nicht statistisch signifikant sind, würde dies bedeuten, dass nicht nachgewiesen werden kann, dass die Dachbegrünung das Raumklima beeinflusst. Eine Voraussetzung für den T-Test ist, dass die Standardabweichungen beider zu vergleichender Datengruppen in etwa gleich groß sind. Bei großen Datenmengen ist dies aber nicht mehr zwingend erforderlich. Bei der vorliegenden Datenbasis mit über 15.000 Wertepaaren ist davon auszugehen, dass der T-Test auch dann anwendbar ist, wenn der Unterschied der Standardabweichung größer ausfallen sollte.

Dem T-Test werden zwei Hypothesen zugrunde gelegt. Die Nullhypothese H_0 weißt im Rahmen dieser Analyse auf keinen Unterschied der Lufttemperaturen in den Räumen aufgrund der Dachbegrünung hin. Dagegen zeigt die Gegenhypothese H_1 einen Unterschied der Lufttemperaturen in den Räumen aufgrund der Dachbegrünung an. Dieser Analyse wird ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ zugrunde gelegt. Bei Ergebnissen größer 5 % wird H_0 angenommen, während bei Ergebnissen kleiner 5 % H_0 verworfen wird und damit H_1 angenommen wird.

3.3.2 Luftfeuchtigkeitsbeziehungen

Um prüfen zu können, ob die Dachbegrünung einen Einfluss auf den Luftfeuchtegehalt der Räume hat, muss darauf geachtet werden, dass die Luftfeuchtigkeit entscheidend von der vorherrschenden Raumtemperatur abhängt.

In einem ersten Schritt soll, wie schon bei den Zusammenhängen der Lufttemperaturen, eine statistische Analyse durchgeführt werden. Hierfür soll Standardabweichung nach derselben Methode wie vorangegangenem Kapitel beschrieben, für alle Jahreszeiten durchgeführt werden. Im Anschluss daran sollen wieder T-Tests durchgeführt werden, um zu prüfen ob die Unterschiede signifikant sind. In diesem Fall wird, ebenfalls mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$, die Nullhypothese H_0 definiert als kein Unterschied der Luftfeuchte in den Räumen und die Gegenhypothese H_1 definiert als Unterschied der Luftfeuchte in den Räumen.

3.4 Methodik Modellberechnungen

Um prüfen zu können, was eine großflächige Begrünung der Flachdächer in Städten für Auswirkungen hätte, sollen Modellberechnungen durchgeführt werden.

3.4.1 RRB-Verkleinerung

Im Blick auf die Retentionsfähigkeit soll berechnet werden, ob durch großflächige Dachbegrünungen Regenrückhaltebecken, nachfolgend RRB, kleiner dimensioniert werden können, da durch Gründächer teilweise Abflüsse deutlich reduziert werden können.

Hierfür sollen RRBs für drei verschiedene Bebauungszustände errechnet werden. Ein RRB soll sich in einer dicht bebauten Innenstadt befinden, ein weiteres in einer Umgebung mit mittlerer Bebauung und ein drittes in einer ländlichen Lage. Folgende Festsetzungen gelten für alle Bebauungsarten:

- Alle Dächer sind Flachdächer und potenziell begrünbar
- die Entwässerung findet im Trennsystem statt
- das komplette Einzugsgebiet ist kanalisiert

Für die Volumenberechnungen sollen verschiedene mittlere Abflussbeiwerte C_m angewendet werden. Neben dem im Rahmen dieser Analyse ermittelten Wert für C_m sind auch der Abflussbeiwerte aus DWA-M 153 der mit den in der Literatur angegebenen Wert übereinstimmt anzusetzen.

Die konkreten Festsetzungen für die einzelnen Bebauungsarten sind im Anhang unter Kapitel 8.4.1 in den Tabellen 26, 27 und 28 dargestellt.

Die Berechnung der jeweils benötigten RRB-Volumen findet unter Anwendung des „einfachen Verfahrens“ nach DWA-A 117 statt. Die dafür benötigten Festsetzungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 2 Festsetzungen für die Berechnung des RRB-Volumens nach dem „einfachen Verfahren“

Einzugsgebietsfläche kanalisiert $A_{E,k}$	5 ha
Fließzeit	10 min
Zulässige Drosselabflussspende in den Vorfluter	Kleiner Flachlandbach 15 l/(s*ha)
Zuschlagsfaktor f_z	1,2
Abminderungsfaktor	Unterschiedlich, nach Bild 3, DWA-A117
Bemessungsregenhäufigkeit = Überschreitungshäufigkeit RRB	$n = 0,2$ bzw. $T = 5$

Die Basis für die Regenspenden soll die KOSTRA Tabelle des DWD von Weidenbach bilden. Die Bemessungsregen sollen zur besseren Vergleichbarkeit der drei Varianten untereinander eine Wiederkehrzeit von $T = 5$ Jahren haben. Die KOSTRA Daten für Weidenbach sind im Anhang unter Kapitel 8.4.1 Abbildung 38 abgebildet.

Die jeweils undurchlässige Fläche in Abhängigkeit des Abflussbeiwertes der Dachbegrünung kann mit folgender Formel ermittelt werden:

$$A_U = A_V \cdot C_{\text{Verkehrsfläche}} + A_{D,g} \cdot C_{\text{Gründach}} + A_{D,ng} \cdot C_{\text{Flachdach}} + A_{E,nb} \cdot C_{\text{Freifläche}}$$

mit: $A_V =$	Verkehrsflächen [ha]
$A_{D,g} =$	begrünbare Fläche der Dachflächen [ha]
$A_{D,ng} =$	nicht begrünbare Fläche der Dachflächen [ha]
$A_{E,nb} =$	nicht befestigter Fläche des Einzugsgebietes [ha]
$C_{\text{Verkehrsfläche}}$	Spitzenabflussbeiwert der Verkehrsflächen
$C_{\text{Gründach}}$	Spitzenabflussbeiwert der Dachbegrünung
$C_{\text{Flachdach}}$	Spitzenabflussbeiwert der unbegrünbaren Dachflächen
$C_{\text{Freifläche}}$	Spitzenabflussbeiwert der Freiflächen

3.4.2 Einfluss der Verzögerung der Abflussscheitel

Um darstellen zu können, welchen Einfluss eine Dachbegrünung auf die zu verbauenden Entwässerungseinrichtungen bei Dachflächen hat, soll eine Modellrechnung auf Basis der DIN 1986-100 durchgeführt werden.

Hierfür soll modellhaft ein Dach, vergleichbar mit dem den Analysen zugrunde gelegten, untersucht werden. Dieses hat eine Gesamtgröße von 14.300 m² und ist in Varianten untergliedert. Variante 1 stellt ein unbegrüntes Dach mit konventioneller Dachabdichtung dar während Variante 2 ein zu 70% begrüntes (Aufbauhöhe 10 cm, Gefälle < 5 %) und zu 30 % konventionell abgedichtetes Flachdach darstellt.

Die Festsetzung, dass lediglich 70 % einer Flachfläche begrünt werden können beruht auf Abstandsflächen und technische Aufbauten, welche nicht begrünt werden können (BRENNEISEN, 2008).

Bei der Modellberechnung soll einerseits ermittelt werden, wie viele Dachabläufe für beide Varianten notwendig werden und welche Dimension die Niederschlagssammelgrundleitungen aufweisen müssen. Hierfür sollen die anfallenden Regenmengen mithilfe der Spitzenabflussbeiwerte C_s auf Basis der DIN 1986-100, des im Rahmen dieser Analyse ermittelten Abflussbeiwerts und anderen aus Literatur abgeleiteten Spitzenabflussbeiwerten ermittelt werden.

In folgender Tabelle sind in die Berechnung einfließende Parameter dargestellt.

Bemessungsregenspende $r_{5,5}$ für Weidenbach	374,2 l/(s*ha) (KOSTRA, 2010)
Spitzenabflussbeiwerte Gründach C_s	Eigene Analyse: 0,5 DIN 1986-100: 0,4 Literatur: 0,3 (vgl. Diskussion Abflussbeiwerte)
Spitzenabflussbeiwert konventionelles Dach	1,0
Entwässerungsart	Freispiegelentwässerung
Betriebliche Rauheit (Vorgabe DIN 1986-100)	$k_b = 1,0$ mm
Gefälle J	1 %
zulässige Fließgeschwindigkeiten	min. 0,7 m/s, max. 2,5 m/s
zulässiger Füllungsgrad Grundleitung	$h/d_i = 0,7$

Bei der Berechnung der Abflussmengen für die Variante 2 sollen Abflüsse von Gründach und Foliendach getrennt voneinander berechnet werden. Anschließend soll verglichen werden, welcher berechnete Spitzenwasseranfall höher ist. Der höhere Wert ist für die Bemessung der Abflusseinrichtungen relevant.

Die Abflussspitze der konventionellen Fläche wird zeitgleich mit dem Regen den Ablaufeinrichtungen zufließen, da kaum Retentionseffekte auftreten und der Spitzenabflussbeiwert mit 1,0 maximal ist. Die Ablaufspitze des Gründachs trifft frühestens nach dem Regenereignis in die Abläufe (vgl. Kapitel 2.3), während des kurzen Regenereignisses von 5 Minuten ist nach Versuchen von KOLB (2002) nicht damit zu rechnen das nennenswerte Abflüsse vor Ende des Regenereignisses auftreten.

3.4.3 Verdunstung – Entgegenwirkung der Urban Heat Island

Wie schon in Kapitel 2.5 beschrieben bieten Dachbegrünungen theoretisch die Möglichkeit der Ausbildung der Urban Heat Islands entgegenzuwirken. Um diesen Effekt nachweisen zu können soll für die einzelnen oben geschilderten Modellstadtgebieten berechnet werden, welchen Einfluss Begrünungen hätten.

Mithilfe der Lysimeterdaten ist es möglich zu bestimmen, wie viel Wasser innerhalb einer Stunde zu einem bestimmten Zeitpunkt verdunstet. Dies entspricht der realen Verdunstung.

Daher sollen zunächst für die einzelnen Jahreszeiten die jeweiligen mittleren Verdunstungsraten berechnet werden. Auf Basis dieser Werte soll anschließend ermittelt werden, welcher Anteil der Globalstrahlung täglich durch Verdunstungsprozesse abgebaut wird. Für die energetischen Berechnungen soll die Verdunstung von Wasser mit 2,46 MJ/kg bzw. 0,68 kWh/kg bilanziert werden.

Anschließend sollen die Angaben, die sich jeweils auf 1 m² Grünfläche beziehen, auf die jeweils begrünbaren Dachflächen der drei Bebauungsmöglichkeiten hochgerechnet werden. Damit soll der Einfluss der Dachbegrünung in den einzelnen Jahreszeiten erkennbar gemacht werden. Frei- und Parkflächen, welche in den einzelnen Bebauungsvarianten vorhanden sind, sollen die gleiche Verdunstungsrate wie die Dachbegrünung aufweisen. Hierfür wird die effektive Verdunstungsfläche als *f_{Verdunstung}* eingeführt. Diese beschreibt den Anteil der Verdunstungsflächen bezogen auf die gesamte Fläche des Modellbebauungsgebiet. Die Verdunstungsenergiemengen sollen dafür jeweils pro Tag berechnet werden und anschließend mit der mittleren langjährigen Tagesglobalstrahlung in Deutschland verglichen werden.

Die Ausbildung der städtischen Wärmeinsel ein komplexer Vorgang, bei dem neben der einfachen Erhitzung der Oberflächen auch andere Faktoren mitspielen. Daher ist es nach BRENNISEN (2008) schwierig belastbare Aussagen über den konkreten Einfluss der Dachbegrünungen in Bezug auf Temperaturreduzierungen im Stadtklimasystem zu treffen.

Daher soll in diesem Abschnitt der Arbeit der Fokus auf die Quantifikation des Energieentzugs durch Verdunstung gelegt werden.

3.5 Methodik Wirtschaftlichkeitsberechnung

Zur Prüfung der Wirtschaftlichkeit soll für die Modellgebäude aus Kapitel 3.4.2 vergleichende Kostenanalyse durchgeführt werden.

Die anfallenden Kosten bei Foliendach und Gründach unterteilen sich in die Kostengruppen Erstinvestitionskosten, Pflege-/Unterhaltskosten, Sanierungskosten und den Einsparungsmöglichkeiten beim Regenwasserentgelt. Die Erhebung der Kostengrößen für die einzelnen Faktoren wird nun dargestellt.

Die **Erstinvestitionskosten** bilden die Grundlage für die Berechnungen. Die Investitionskosten für das Gründach werden auf Basis der Preislisten des Herstellers *ZinCo* berechnet. Die Kosten für die konventionelle Dachabdichtung werden aus aktuellen Literaturwerten abgeleitet.

Von den Erstinvestitionskosten wird in vielen deutschen Städten mit angespanntem Entwässerungssystem ein Teil der anfallenden Gründachkosten von der Kommune übernommen. Daher soll in die Berechnung der Erstinvestitionskosten ein Zuschuss miteinfließen. Die Höhe der Förderung wird aus den Rückläufen einer Umfrage der Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V. (FBB) von 2016/2017 berechnet. Ziel dieser Umfrage war die Höhe der Zuschüsse in den jeweiligen Städten zu erfragen.

Für **Pflege- und Unterhaltskosten** werden markttypische Preise für Dachbegrünungen und Foliendächer der Größe 10.000 m², vorgelegt von der Firma *ZinCo*, verwendet.

Die Höhe der anfallenden **Sanierungskosten** richtet sich bei beiden zu untersuchenden Flächentypen nach der Lebensdauer der einzelnen Bauteile. Nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BBSR, 2011) zählt eine Dachabdichtung in Form einer extensiven Begrünung als schwere Schutzschicht, welche die Lebensdauer des Daches auf 40 Jahre erhöht (vgl. Kapitel 2.4 Abbildung 2). Das konventionelle Dachabdichtungssystem, hier ein Foliendach, kommt dagegen lediglich auf eine Lebensdauer von 20 Jahren. Dies führt dazu, dass bei einer Betrachtungszeit von 40 Jahren für die Berechnungen lediglich für das

Foliendach eine Sanierung fällig wird. Für die Sanierung werden Kosten in Höhe der Erstinvestition angenommen (BURK, 2019).

Im Hinblick auf das **Regenwasserentgelt** müssen in vielen deutschen Städten bei begrünten Dächern nur die Hälfte der Abwassergebühr entrichtet werden (FFB, 2017). Für die Gemeinde Röttenbach liegt diese zum Zeitpunkt der Analyse bei 1,98 €/m²*a (GEMEINDE RÖTTENBACH, 2018). Für die Berechnungen in der Modellstadt werden für begrünte Flächen die Hälfte der Abwassergebühr der Gemeinde Röttenbach angenommen.

Dynamische Kostenvergleichsrechnung nach den KVR-Leitlinien der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2005)

Kostenvergleichsrechnungen werden in der Wasserwirtschaft eingesetzt, um alternative Lösungsvarianten gegenüberzustellen wirtschaftlichste Variante herauszusuchen. Es gibt prinzipiell zwei verschiedene Vorgehensweisen, um Kostenvergleiche durchzuführen, die statische Methode und die dynamische Methode. Diese unterscheiden sich in ihrem Umfang und der Belastbarkeit der erzielten Ergebnisse. Nachfolgend wird das Verfahren der dynamischen Kostenvergleichsrechnung nach LAWA vorgestellt, welches im Rahmen dieses Kostenvergleichs verwendet werden soll.

Bei der Dynamischen Methode wird sowohl der Zeitpunkt der anfallenden Kosten durch Auf- und Abzinsung berücksichtigt als auch die Nutzungsdauern der jeweiligen Bauteile. Hierfür müssen alle anfallenden Kosten im zu vergleichenden Zeitraum vorhanden sein. Diese werden wertmäßig auf einen Betrachtungszeitpunkt umgerechnet. Kosten die vor diesem Bezugszeitpunkt anfallen sind aufzuzinsen, Kosten, die nach dem Bezugszeitpunkt anfallen sind abzuzinsen. Der Wert aller Kostengrößen (Barwerte) bezogen auf den Bezugszeitpunkt wird Projektkostenbarwert (PKBW) genannt.

Für die Auf- und Abzinsungen wird ein realer, inflationsbereinigter Zinssatz verwendet. Dieser wurde nach Abstimmung zwischen Bund und Ländern für Berechnungen der Wasserwirtschaft auf $i_r = 3 \%$ festgelegt (LAWA, 2005). Bei den Kostenposten wird unterschieden zwischen einmalig anfallenden Kosten wie Investitionskosten und laufenden Kosten wie Pflege- und Unterhaltskosten.

Einmalige Kosten werden nach dem Jahr des Anfalls auf den Bezugszeitpunkt, Jahr 0 auf- bzw. abgezinst. Hierfür wird der Akkumulationsfaktor (AFAKE) bzw. der Diskontierungsfaktor (DFAKE) jeweils für eine Einzelzahlung verwendet.

Der Akkumulationsfaktor (AFAKR) bzw. Diskontierungsfaktor (DFAKR) wird für vor bzw. nach dem Bezugszeitpunkt liegende gleichförmige jährliche Kostenreihen angewendet.

Der Untersuchungszeitraum der Berechnung bezieht sich auf die vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumplanung genannte Lebensdauer von einer extensiven Dachbegrünung von 40 Jahren.

Nachfolgend werden die Eingangsparameter für die dynamische Kostenvergleichsrechnung in tabellarischer Form dargestellt.

Eingangsparameter und Festsetzungen	
Dachfläche	14.300 m ²
Davon für das Gründach zu begrünen	10.000 m ²
Realer Zinssatz i_r	3 %
Regenwasserentgelt	1,98 €/m ² *a)
Förderhöhe für das Gründach (Mittelwert aller verfügbaren Daten)	5354 €
Untersuchungszeitraum der dynamischen Kostenvergleichsrechnung	40 Jahre
Nutzungsdauern:	
Foliendach	20 Jahre (BBSR)
Gründach	40 Jahre (BBSR)
Investitionskosten	
Kosten Foliendachabdichtung	24 €/m ² (HCU, 2017)
Kosten extensive Begrünung Setzt sich zusammen aus:	54 €/m ² (HCU, 2017 und <i>ZinCo</i> , 2019) Kosten Foliendachabdichtung: 24 €/m ² + Kosten Begrünung: 30 €/m ²
Fertigstellungspflege Gründach (im ersten Jahr nach der Bepflanzung)	1,15 €/m ² (BURK, 2019)
Laufende Kosten/Unterhaltskosten	
Unterhaltungspflege Foliendach	0,25 €/m ² (BURK, 2019)
Unterhaltungspflege Gründach	0,65 €/m ² (BURK, 2019)
Sanierungskosten	
Sanierungskosten Foliendach nach 20 Jahren (DFAKE)	Selbe Höhe wie die Investitionskosten, aber diskontiert (BURK, 2019)

4. Ergebnisse

Nachfolgend werden die im Rahmen dieser Analyse gewonnenen Ergebnisse dargestellt.

4.1 Zustand der Dachflächen Messeinrichtungen

4.1.1 Zustand der verschiedenen Dachflächen

Im Rahmen der Untersuchung des Zustandes der Dachflächen wurden Begehungen durchgeführt. Nachfolgend sind die Zustände der einzelnen Dachflächen dargestellt.

Bei der **extensiven Begrünung** konnten keine Schäden und Fehlwüchse gefunden werden. Die Vegetationstragschicht wies, übereinstimmend mit den Bauplänen, eine Mächtigkeit von ca. 7 cm auf. Auch die Pflanzenartenverteilung entsprach der zum Pflanzzeitpunkt. Eine Abbildung des Zustandes der Begrünung ist im Anhang unter Kapitel 8.1 in Abbildung 28 dargestellt.

Beim **Foliendach** konnten an der tatsächlichen Dachabdichtung keine Schäden festgestellt werden, die Folie wies keine Risse oder ähnliches auf. Lediglich das Gefälle des Daches zum Wasserabfluss wies Mängel auf. Dies führt zu auf dem Dach verbleibendem Wasser nach Regenereignissen, dies ist auf der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 12 Fehlendes Gefälle zur Dachentwässerung (eigene Aufnahme, 2019)

4.1.2 Lysimeter

Der **Gründachlysimeter** wies keinerlei Beschädigungen auf, die Pflanzendecke ist geschlossen und auch bei der Überprüfung der Vegetationstragschichtstärke konnten keine Abweichungen gefunden werden. Eine Darstellung des Zustandes ist im Anhang unter Kapitel 8.1 in Abbildung 29 dargestellt.

Der **Foliendachlysimeter** wies im Gegensatz zum restlichen Dach, deutliche Veränderungen im Vergleich zum Einbauzustand auf. Die Form der jetzigen Abdichtung des Foliendachlysimeters lässt sich als muldenförmig mit Auswölbungen der Dachabdichtung beschreiben. Dies ist im Anhang unter Kapitel 8.1 in Abbildung Nr. 30 dargestellt.

4.2 Ergebnisse Niederschlags-Abfluss-Verhältnisse

4.2.1 Jahresabflussbeiwert / Jahreszeitlicher Abflussbeiwert

Tabelle 3 Jahresabflussbeiwerte der Jahre 2017 und 2018

Jahresabflussbeiwert des Jahres	Ψ_a Foliendach	Ψ_a Gründach
2017	0,87	0,45
2018	0,59	0,50
kombiniert	0,73	0,47

Tabelle 4 Niederschlag/Abfluss-Bilanzen der Jahre 2017/2018

Jahr	Niederschlag [l]	Foliendach	Gründach
		Abfluss [l]	Abfluss [l]
2017	720,0	628,3	323,9
2018	678,5	403,6	337,7
kombiniert	699,3	516,0	330,8

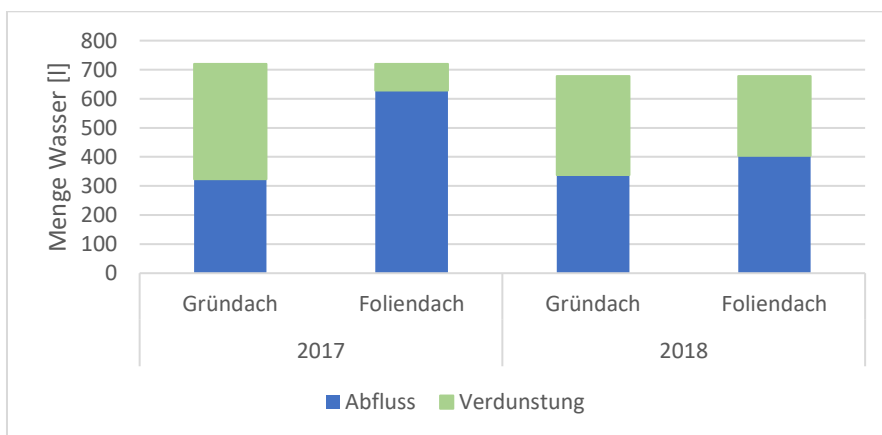


Abbildung 13 Jahreswasserhaushalt im Vergleich zwischen Gründach und Foliendach (eigene Darstellung, 2019)

Tabelle 5 Jahreszeitliche Abflussbeiwerte Foliendach

	2017	2018	2019
Frühling	1,00	0,30	1,00

Sommer	0,80	0,004	-
Herbst	0,67	0,94	-
Winter	0,97	0,93	-

Tabelle 6 Wasserbilanz Foliendach

	2017 [l]		2018 [l]		2019 [l]	
	Niederschlag [l]	Abfluss [l]	Niederschlag [l]	Abfluss [l]	Niederschlag [l]	Abfluss [l]
Frühling	150,4	160	154,5	46,2	107,1	131,7
Sommer	265,8	211,2	149,9	0,6	-	-
Herbst	176,5	119	175,1	163,9	-	-
Winter	202,3	196,9	212,7	197,8	-	-

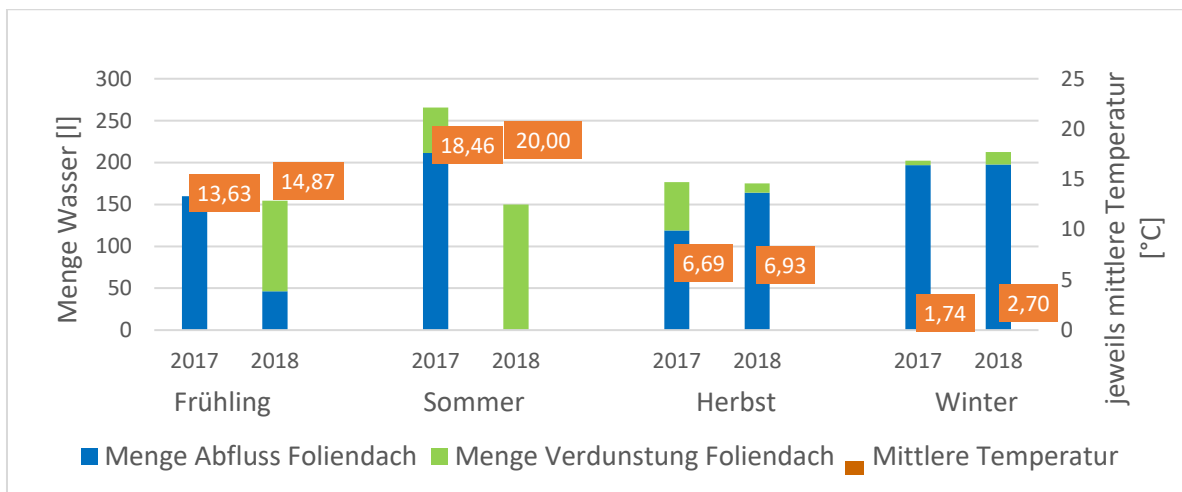


Abbildung 14 Wasserhaushalt Foliendach für die Jahre 2018/19 (eigene Darstellung, 2019)

Tabelle 7 Jahreszeitliche Abflussbeiwerte Gründach

	2017	2018	2019
Frühling	0,31	0,21	0,22
Sommer	0,35	0,21	-
Herbst	0,64	0,66	-
Winter	0,78	0,72	-

Tabelle 8 Wasserbilanz Gründach

	2017 [l]		2018 [l]		2019 [l]	
	Niederschlag [l]	Abfluss [l]	Niederschlag [l]	Abfluss [l]	Niederschlag [l]	Abfluss [l]
Frühling	150,4	46,3	154,5	32,2	107,1	23,1
Sommer	265,8	91,6	149,9	31,6	-	-
Herbst	176,5	112	175,1	115	-	-
Winter	202,3	156,9	212,7	152,3	-	-

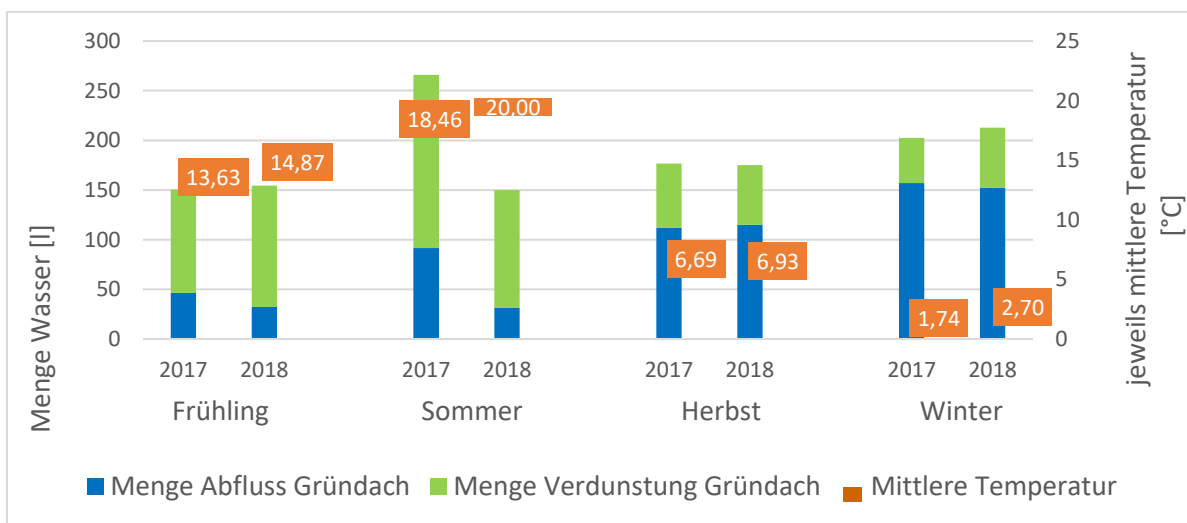


Abbildung 15 Wasserbilanz für das Gründach für die Jahre 2018/19 (eigene Darstellung, 2019)

4.2.2 Wasserspeicherkapazität der extensiven Dachbegrünung

Insgesamt wurden die geforderten Bedingungen bei 36 Regenereignissen erfüllt, in der untenstehenden Grafik sind diese dargestellt. Der Mittelwert der Werte ergibt für das wassergesättigte Dach ein Gewicht von 161,77 kg.

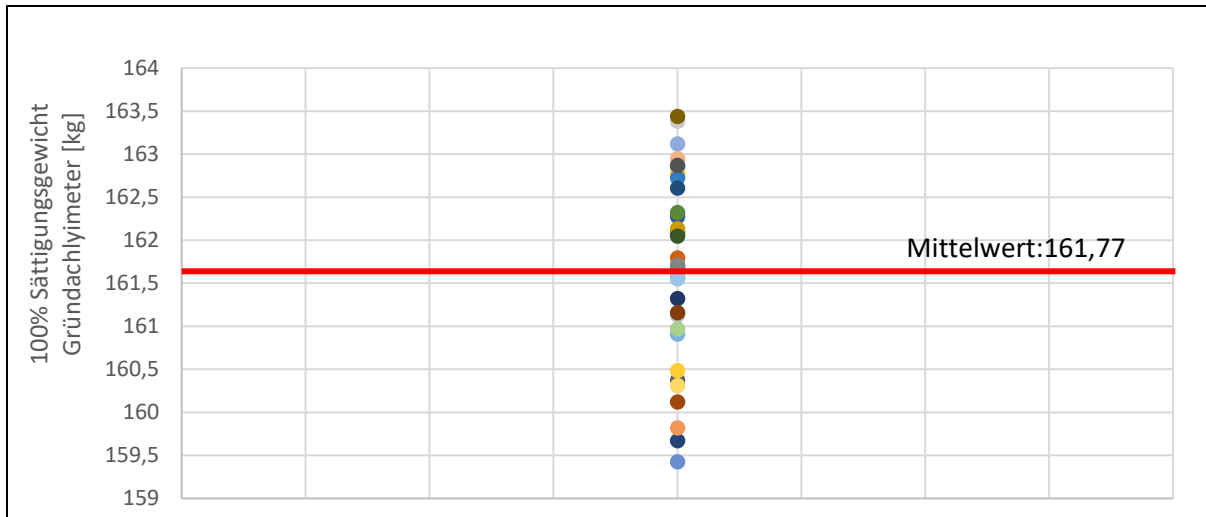


Abbildung 16 Verteilung der Gewichte des Gründachs bei Erreichung der 100% Sättigung (eigene Darstellung, 2019)

Im Zeitraum vom 02/04/2018 bis zum 10/05/2018 verlor das Gründach 31,98 kg in Form von Wasser bei einer durchschnittlichen Außentemperatur von 14,6°C. Mithilfe der Logarithmischen Trendlinie aus Excel, die weiteren 50 Tagen Trockenheit entsprechen soll, konnte abgeschätzt werden, dass das Trockengewicht des Gründachlyimeters bei ca. 125 kg liegen muss. Das Trockengewicht ist als roter Kreis im Diagramm dargestellt.

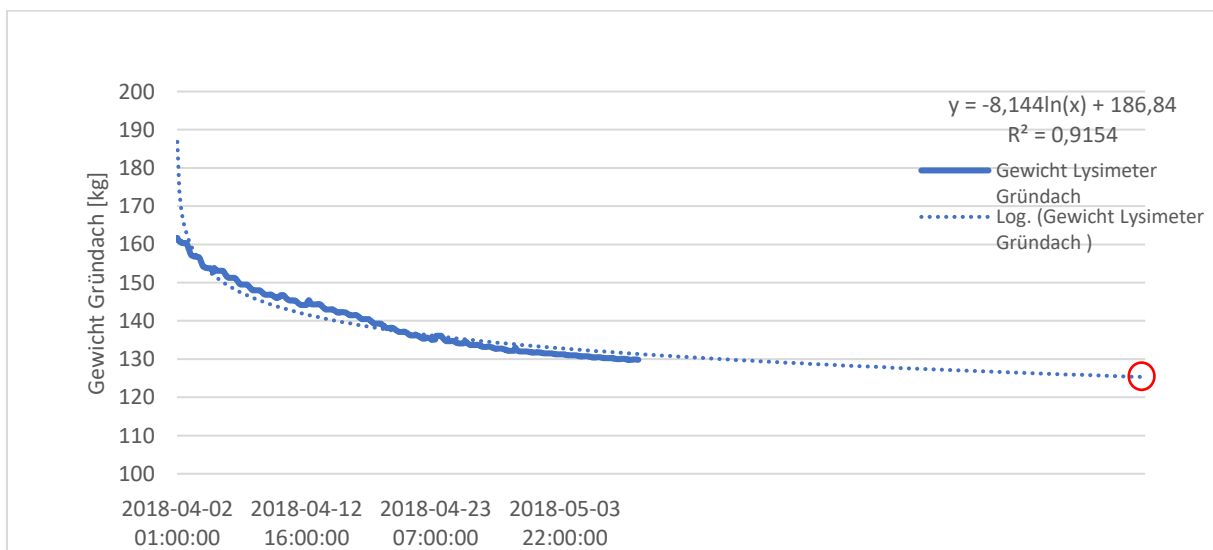


Abbildung 17 Darstellung der längsten Trockenperiode (eigene Darstellung, 2019)

Aus der Differenz der Gewichte bei maximaler und minimaler Sättigung lässt sich eine Wasserspeicherkapazität von 36,77 kg/m² berechnen.

4.2.3 Wasserspeicherkapazität und Wassersättigung

In der nachfolgenden Tabelle sind die mittleren Wassersättigungen der einzelnen Jahre aufgeführt.

Tabelle 9 Mittlere Wassersättigung des Gründaches

	2017 [%]	2018 [%]	2019 [%]
Frühling	61,12	52,09	53,16
Sommer	57,58	39,60	-
Herbst	91,64	64,07	-
Winter	100	92,47	-
Ganzjährig	77,60	62,06	-

4.2.4 Ermittelte Abflussbeiwerte für Cs und Cm

Spitzenabflussbeiwert Cs für Gründach und Foliendach

Nachfolgend wird das beschriebene Verfahren zur Ermittlung des Spitzenabflussbeiwerts Cs beim Gründach dargestellt:

Tabelle 10 Ermittlung von Cs für das Gründach

Betrachtung der Starkregenereignisse > 10 l/h (ohne Schneeereignisse)				
Datum	Uhrzeit	Niederschlagsmenge [l/h]	Wassersättigung vor Regenereignis [%]	Cs
29.06.2017	03:00	11,4	31,29	0,20
29.06.2017	06:00	14,6	66,80	0,59
29.06.2017	07:00	10,4	81,93	1,00
24.05.2018	05:00	11,6	49,44	0,05
11.06.2018	21:00	20,1	51,83	0,37
05.07.2018	16:00	25,2	51,65	0,60
06.07.2018	02:00	14,8	81,14	0,53
Mittelwert				0,48

Daraus lässt sich für Cs ein Wert von 0,5 für die bei HTI verbaute extensive Dachbegrünung ableiten.

Foliendach:

Insgesamt konnten 199 Regenereignisse für die Analyse verwendet werden. Hierbei lag Cs bei 175 Niederschlagsereignissen bei 1,0. Im Mittel aller Regenereignisse liegt Cs bei 0,995. Daraus wurde für das Foliendach ein Spitzenabflussbeiwert Cs von 1,0 festgelegt.

Mittlerer Abflussbeiwert C_m für Gründach und Foliendach

Der Jahresabflussbeiwerte der extensive Dachbegrünung liegt bei $C_m = 0,47$.

Tabelle 11 Ermittlung von C_m für das Gründach

Betrachtung aller Regenereignisse bei denen \sum Ablauf Gründach >0 ist	
Anzahl der betrachteten Regenereignisse	n = 77
Spannbreite C_m	0,04 bis 1,0
Mittelwert C_m	0,57

Aus diesen beiden Datenquellen wird für den mittleren Abflussbeiwert C_m ein Wert von 0,5 abgeleitet. Dieser wird im Rahmen dieser Analyse verwendet.

Foliendach:

Insgesamt konnten 190 Regenereignisse für die Analyse verwendet werden. Davon lag C_m in 141 Fällen bei 1,0. Im Mittel aller verwendeten Regenereignisse liegt C_m bei 0,9.

Da C_m bei fast 75 % aller betrachteten Regenereignisse bei 1,0 lag, wird für C_m der Wert 1,0 definiert.

Ausnahmen bei Abflussbeiwerten

Im (Hoch-)Sommer 2018 konnte festgestellt werden, dass es vermehrt bei Regenereignissen zu keinem Abfluss vom Foliendach kam, während das Gründach Niederschlagsspitzen mit nur geringer Retention in den Abfluss leitete. Dies ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

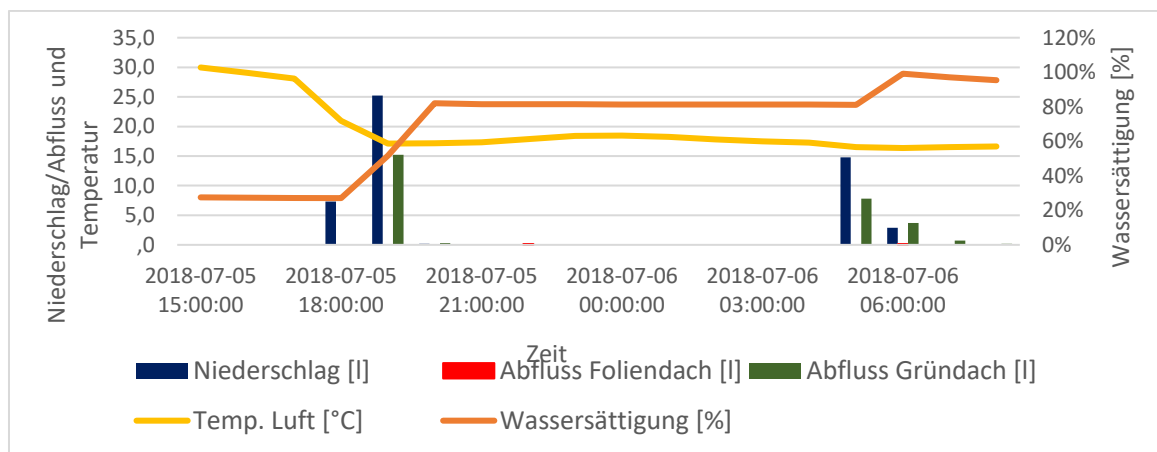


Abbildung 18 Abflussbesonderheit im Hochsommer vom 05.07.2018 (eigene Darstellung, 2019)

Im obenstehenden Diagramm ist zu sehen, dass vom konventionellen Foliendach nur minimale Abflüsse auftreten (u.a. 2018-07-05 um 22.00 Uhr), während das Gründach insgesamt mehr als 50 % der Niederschlagsmenge wieder ableitet. Daraus können für das gesamte oben dargestellte Niederschlagsereignis Abflussbeiwerte für das Foliendach von $C_m = 0$ und $C_s = 0$ gefolgert werden. Beim Gründach ergeben sich Abflussbeiwerte von $C_m = 0,56$ und $C_s = 0,6$.

In einem zweiten Diagramm im Anhang unter Kapitel 8.2.3 Abb. Nr. 37 ist ein Niederschlagsereignis vom 28.06.2017 dargestellt. Dort leitet das Gründach insgesamt ca. 10% mehr Niederschlagswasser ab, als das Foliendach.

Hieraus stellt sich die Frage, warum das Gründach entgegen der Erwartung eine schlechtere Leistung in Bezug auf Wasserrückhaltung zeigt, als die konventionelle Dachfläche. Der oder die Gründe, die dieses Verhalten hervorrufen sollen in der Diskussion unter Kapitel 5.2.5 im Abschnitt „Ausnahmen bei den Abflussbeiwerten“ betrachtet werden.

4.2.5 Schneebeobachtung

In den Wintermonaten fiel auf, dass das Verhalten von Gründachlysimeter zu Foliendachlysimeter bei Temperaturen unter 0°C nicht korreliert.

Im unten dargestellten Diagramm nimmt das Gewicht des Gründachlysimeter in einem Zeitraum von 24 h um fast 15 kg zu und wieder ab, während der Foliendachlysimeter im selben Zeitraum ca.5 kg Gewicht verliert und anschließend wieder zunimmt.

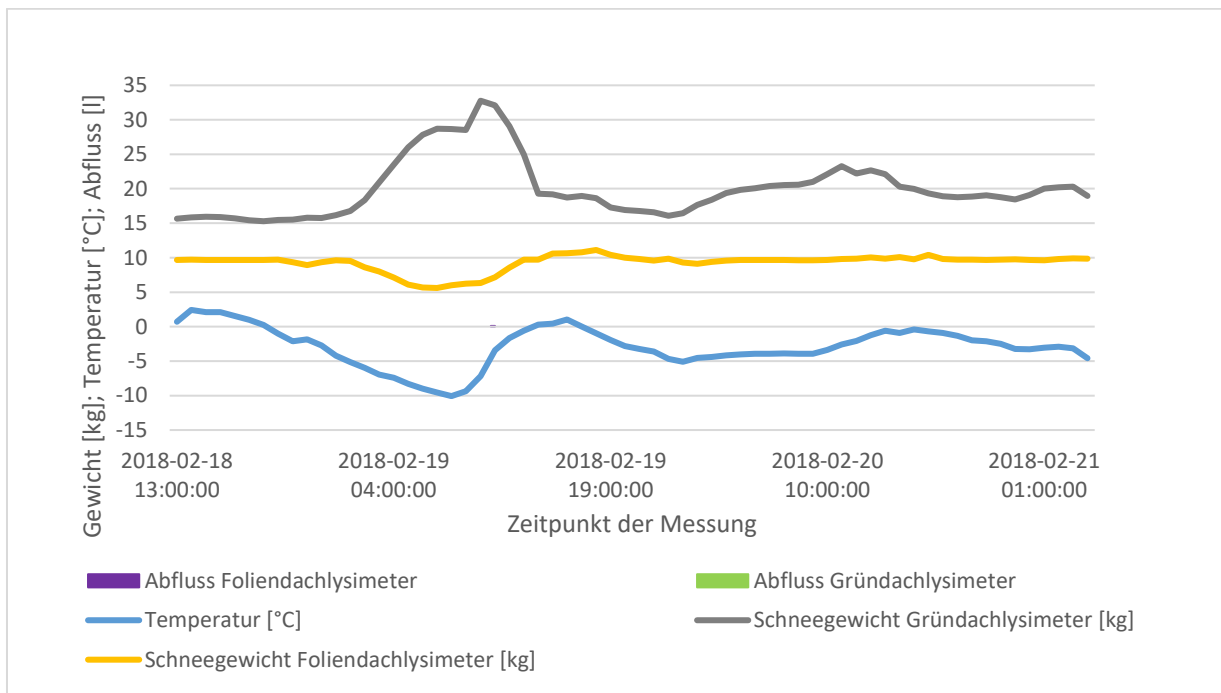


Abbildung 19 Probleme bei der Gewichtserfassung der Lysimeter während Frostperioden (eigene Darstellung, 2019)

Bei dem betrachteten Zeitraum handelte es sich um eine durchgehende Frostperiode mit Temperaturen zwischen 0 und -10°C. Daher ist nicht davon auszugehen, dass eine Schneeschmelze eingetreten ist. Es wurden keine Abflüsse von den Lysimetern registriert. Zudem gab es in dem betrachteten Zeitraum keinen Niederschlag in Form von Regen. Da das Gründach an Gewicht zunahm während das Foliendach Gewicht verlor kann auch Niederschlag in Form von Schnee ausgeschlossen werden.

In untenstehender Abbildung ist diese auftretende Fehlfunktion erneut dargestellt.

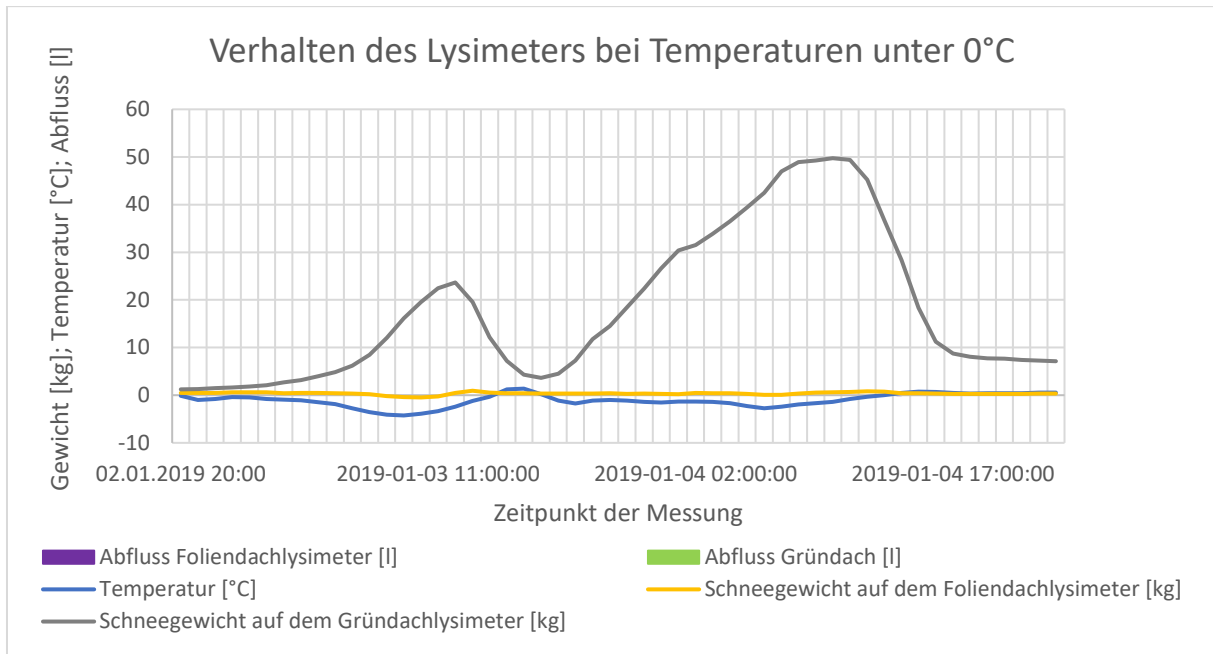


Abbildung 20 Verhalten der Lysimeter bei Temperaturen unter 0°C (eigene Darstellung, 2019)

Aufgrund der oben beschriebenen Vorgänge der Lysimeter können keine sinnvollen Ergebnisse in den Wintermonaten erzielt werden. Hier liegt die Temperatur ca. 30 % der Zeit unter 0°C. Dadurch wäre die Datengrundlage in nicht unerheblichem Umfang fehlerhaft.

4.3 Ergebnisse Raumklima

4.3.1 Temperaturzusammenhänge

In der nachfolgenden Tabelle werden die Ergebnisse des T-Test aufgeteilt nach Jahreszeiten verkürzt dargestellt. Nachweisbar bedeutet dabei, die H1 Hypothese wurde angenommen, da das erzielte Ergebnis kleiner als 5 % war. Eine vollständige Darstellung der erzielten Ergebnisse ist im Anhang unter Kapitel 8.3 Tabelle 24 aufgeführt.

Tabelle 12 Statistischer Zusammenhang Temperatur

Jahreszeit	Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar?
Frühling 2017	Nachweisbar
Frühling 2018	Nachweisbar
Frühling 2019	Nicht nachweisbar
Sommer 2017	Nachweisbar
Sommer 2018	Nachweisbar
Herbst 2017	Nicht nachweisbar
Herbst 2018	Nicht nachweisbar
Winter 2017	Nachweisbar
Winter 2018	Nachweisbar

4.3.2 Luftfeuchtigkeitsbeziehungen

Auch in der nachfolgenden Tabelle werden die Ergebnisse des T-Test aufgeteilt nach Jahreszeiten verkürzt dargestellt. Nachweisbar bedeutet dabei, die H1 Hypothese wurde angenommen, da das erzielte Ergebnis kleiner als 5 % war. Im Anhang unter Kapitel 8.3.2 sind in der Tabelle 25 die vollständigen Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 13 Statistischer Zusammenhang Luftfeuchtigkeit

Jahreszeit	Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar?
Frühling 2017	Nachweisbar
Frühling 2018	Nachweisbar
Frühling 2019	Nachweisbar
Sommer 2017	Nachweisbar
Sommer 2018	Nachweisbar
Herbst 2017	Nicht nachweisbar
Herbst 2018	Nachweisbar
Winter 2017	Nachweisbar
Winter 2018	Nachweisbar

4.4 Ergebnisse der Modellberechnungen

4.4.1 Einfluss einer großflächigen Begrünung auf RRB-Volumen

Bei den Berechnungen stellte sich heraus, dass für alle Bebauungsarten ein spezifisches Rückhaltevolumen von $v_{s,u} = 273,72 \text{ m}^3/\text{ha}$ benötigt wurde. Unter Einbeziehung der jeweils abflusswirksamen Fläche, berechnet nach der unter Material und Methoden beschriebenen Formel, ergeben sich für die nötigen Rückhalteräume in folgender Tabelle dargestellte Ergebnisse.

Tabelle 14 Benötigtes RRB-Volumen in Abhängigkeit des Abflussbeiwertes

Abflussbeiwert der Dachbegrünung	Hohe Bebauung		Mittlere Bebauung		Niedrige Bebauung	
	A _u [ha]	V _{RRB} [m ³]	A _u [ha]	V _{RRB} [m ³]	A _u [ha]	V _{RRB} [m ³]
1	4,30	1177	3,90	1068	2,90	794
0,5	3,43	937	2,85	780	2,20	602
0,3	3,08	842	2,43	665	1,92	526
0	2,55	698	1,80	493	1,50	411
RRB Einsparpotential bezogen auf C _m = 1,0:	C _m 0,5: 20 % C _m 0,3: 28 %		C _m 0,5: 27 % C _m 0,3: 38 %		C _m 0,5: 24 % C _m 0,3: 34 %	

4.4.2 Einfluss der Verzögerung der Abflussscheitel

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Dachentwässerungsberechnungen, der in Material und Methoden beschriebenen Varianten dargestellt.

Variante 1 – konventionelles Dach

Bemessungsabfluss bei $r_{5,5}$	535,1 l/s
benötigte Dachabläufe DN 125 nach DIN 1986-100	76
benötigter Durchmesser für die Grundleitung	DN 600

Variante 2:

Abfluss von der konventionellen Teilfläche ($C_s = 1,0$) beim Bemessungsregen:

161 l/s

Gründach Teilfläche:				
	Abflüsse von der Gründachfläche l/s	relevanter Abflussscheitel	Benötigte Anzahl Dachabläufe DN 125 (bezogen auf relevanten Abflussscheitel) [n]	Benötigter Durchmesser für die Grundleitung
Cs 0,5	187,1	Gründach	27	DN 400
Cs 0,4	149,7	Konventionelle Teilfläche	23	DN 400
Cs 0,3	112,3	Konventionelle Teilfläche	23	DN 400

4.4.3 Quantifizierung der Verdunstungsmenge

Die mittleren Verdunstungsmengen in den jeweiligen Jahreszeiten und die sich daraus ergebenden Energiebilanzen für 1 m² Gründach sind im Anhang unter Kapitel 8.4.2 in den Tabellen 29 und 30 aufgeführt. In den nachfolgenden Tabellen findet ein Vergleich zwischen Bebauung ohne Dachbegrünung (o. Db.) und Bebauung mit Dachbegrünung (m. Db.) bezogen auf den Anteil der eintreffenden Globalstrahlung, der in Verdunstung umgesetzt wird, statt. Die Ergebnisse sind jeweils in Prozent angegeben.

Tabelle 15 Verdunstungsmenge verdichtete hohe Innenstadtbauung

	2017		2018		2019	
	o. Db. f _{Verdunstung} = 0,1	m. Db. f _{Verdunstung} = 0,45	o. Db. f _{Verdunstung} = 0,1	m. Db. f _{Verdunstung} = 0,45	o. Db. f _{Verdunstung} = 0,1	m. Db. f _{Verdunstung} = 0,45
Frühling	3	12	3	11	2	11
Sommer	3	12	2	9	-	-
Herbst	2	11	3	12	-	-
Winter	0	1	2	9	-	-

Tabelle 16 Verdunstungsmenge verdichtete mittlere Bebauung

	2017		2018		2019	
	o. Db. f _{Verdunstung} = 0,2	m. Db. f _{Verdunstung} = 0,62	o. Db. f _{Verdunstung} = 0,2	m. Db. f _{Verdunstung} = 0,62	o. Db. f _{Verdunstung} = 0,2	m. Db. f _{Verdunstung} = 0,62
Frühling	5	16	5	16	5	15
Sommer	5	17	4	12	-	-
Herbst	5	15	5	17	-	-
Winter	1	2	4	12	-	-

Tabelle 17 Verdunstungsmenge lockere Bebauung

	2017		2018		2019	
	o. Db. f _{Verdunstung} = 0,4	m. Db. f _{Verdunstung} = 0,68	o. Db. f _{Verdunstung} = 0,4	m. Db. f _{Verdunstung} = 0,68	o. Db. f _{Verdunstung} = 0,4	m. Db. f _{Verdunstung} = 0,68
Frühling	10	18	10	17	10	17
Sommer	11	18	8	13	-	-
Herbst	10	16	11	18	-	-
Winter	1	2	8	13	-	-

4.5 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Kosten der beiden Dachvarianten wurden durch dynamische Kostenrechnung vergleichbar gemacht. Im folgenden Diagramm sind alle in 40 Jahren anfallenden Kosten in einer Kostenentwicklungskurve jeweils für eine Dachvariante dargestellt. Diese sind auf Jahr 0 Ab- bzw. aufgezinnt.

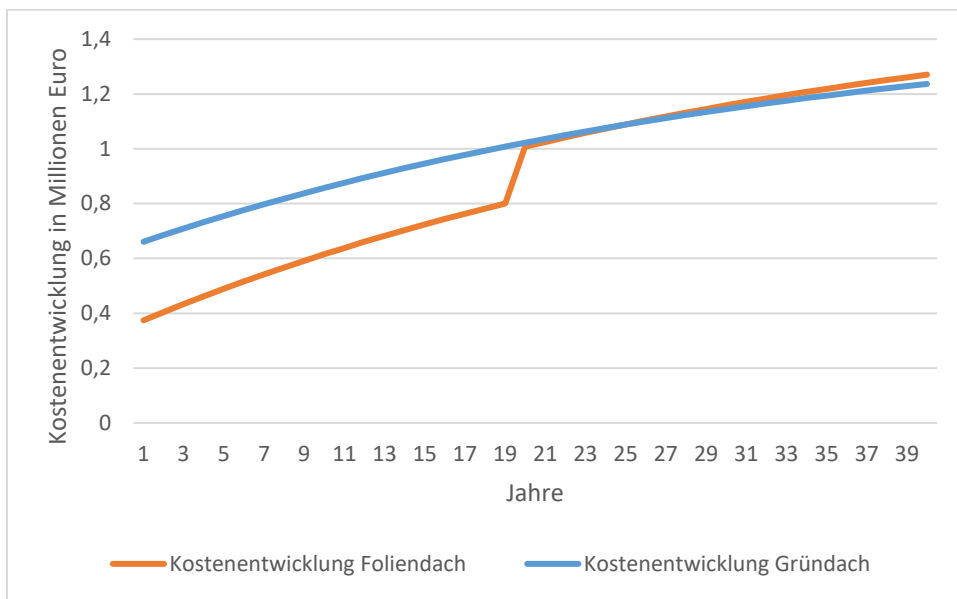


Abbildung 21 Kostenentwicklung der beiden Dachflächen (eigene Darstellung, 2019)

Mit 374.160€ beim Foliendach und 660.863 € beim Gründach liegen die Erstinvestitionskosten des Gründachs deutlich höher. Beim Foliendach werden nach der Hälfte der Nutzungsdauer des Gründachs die Erneuerungskosten in Höhe der Erstinvestitionskosten fällig. Dadurch, und durch die höheren Abwasserbeiträge, übersteigt die Kostenentwicklungskurve des Foliendachs die des Gründachs. Insgesamt liegt der Barwert (PKBW) des Foliendachs mit 1.270.328 € über dem des Gründachs mit 1.236.360 €.

5. Diskussion

5.1 Beschreibung des Dachzustandes und der Messeinrichtungen

5.1.1 Dachzustand

Die am Foliendachlysimeter festgestellten Deformationen können am besten durch die fehlende Verbindung zwischen Foliendachabdichtung und Rand des Lysimeters erklären. Dieses ist lediglich auf die Unterplatte aufgeklebt. Daher gibt es weniger mechanische Spannung, die das System in Form halten könnte. Dies führt dazu, dass sich das Dach unter Temperatureinwirkung stärker dehnen und stauchen kann, wodurch es zu diesem Schadensbild gekommen ist.

Eine weitere mögliche Erklärung für den Verzug der Dachabdichtung könnte an der Verwendung eines ungeeigneten Klebers liegen. Im Anhang Kapitel 8.1 unter Abbildung Nr. 31 ist die mangelhafte Verklebung bzw. das Auflösen des Klebers ersichtlich.

Bei der restlichen Foliendachfläche sind diese Schäden nicht aufgetreten.

5.1.1 Lysimeter

Die nachfolgende Abbildung stellt die Produktbeschreibung der bei *HTI* verbauten Lysimeter dar.

Dachlysimeter mit Abflussmessung

1 184010

Flachlysimeter 1m² Fläche, wägbar, Messbereich 0 ... 120kg, aus Edelstahl 1.4301 bestehend aus:

- Lysimetergefäß 1000 x 1000 x 150mm
- Chassis zur Aufnahme der Wägezellen
- Edelstahlgehäuse 1.100 x 1.100 x 200mm
- vier Wägezellen aus korrosionsfreiem Edelstahl dynamisch belastbar mit Überlastsicherung Schutzart IP67
- Messbereich 0 ... 120kg
- Auflösung 10g
- vier selbstjustierende Einbauhilfen in Edelstahlausführung zur präzisen axialen und momentfreien Krafteinleitung, Schwingungsdämpfend durch Querkraftstabilisation
- Auslaufstutzen seitlich von Lysimeterschrägboden Ø 15mm

Abbildung 22 Produktbeschreibung der Lysimeter (nach UGT, 2016)

In der Produktbeschreibung der verbauten Lysimeter wird der Messbereich mit 0 bis 120 kg angegeben. Dies wäre problematisch in der Hinsicht, da das Gründach je nach Wassersättigung zwischen 125,00 bis 161,77 kg wiegt. Nach Schneefällen wiegt der Lysimeter laut den Angaben aus der Datenbank bis zu 200 kg.

Daher wurde bei der Herstellerfirma *UGT* nachgefragt, wie der angegebene Messbereich anzuwenden ist. Herr Heerdt von *UGT* gab in einer Rückmeldung an, dass der Messbereich auf die vier verbauten Wägezellen zu beziehen ist, daraus ergibt sich ein zulässiger Messbereich von 0 bis 480 kg.

Des Weiteren treten bei beiden Lysimetern die im Kapitel 4.2.8 beschriebenen Fehlfunktionen auf.

5.2 Diskussion Niederschlag-Abfluss-Verhältnisse

5.2.1 Jahresabflussbeiwert / Jahreszeitlicher Abflussbeiwert

Die extensive Dachbegrünung in Röttenbach lässt sich mit ihren 11 cm, vgl. Anhang Kapitel 8.2.1 Tabelle Nr. 22 der Aufbaudicke 10 bis 15 cm zuordnen. Der Standort der Dachbegrünung in Röttenbach liegt im Gültigkeitsbereich der angegebenen Tabelle mit einem Jahresniederschlag von ca. 700 mm. Der erreichte Jahresabflussbeiwert des Gründachs liegt im Mittel der beiden betrachteten Jahre bei 0,47. Dies entspricht dem in der FLL-Dachbegrünungsrichtlinie gelisteten Wert von 0,45. Damit kann validiert werden, dass Dachbegrünungen mit dieser Aufbaudicke eine Jahreswasserrückhaltung von ca. 55 % erreichen.

Interessant sind in diesem Zusammenhang die Veränderungen der Jahresabflusswerte von Foliendach und Gründach im Vergleich zwischen 2017 und 2018. Während das Foliendach den Anteil von abgeleitetem Wasser von 87 auf 59 % reduzierte, erhöhte sich die Menge des abgeleiteten Wassers beim Gründach von 45 auf 50 %.

Die Reduktion beim Foliendach lässt sich mit dem sehr warmen Sommer 2018 erklären, dies ist in den Kapiteln 4.2.5 und 5.2.5 beschrieben. Die Zunahme des Abflusses vom Gründach lässt sich dadurch erklären, dass das Gründach trotz ca. 40 Litern weniger gefallenem Niederschlag im Jahr 2018 ähnlich viel Wasser zum Abfluss brachte, von einer erhöhten Ableitung unter extremen Trockenheitsbedingungen kann daher nicht gesprochen werden. Der Unterschied lässt sich dadurch erklären, dass im Jahr 2018 mehr Niederschlagsereignisse mit größerer Intensität stattfanden als im Jahr 2017. Für die nachfolgende Tabelle wurden alle Niederschlagsereignisse verwendet, die in einer Stunde mehr als 4 mm/m² aufwiesen.

Tabelle 18 Vergleich der Regenereignisse ab 4mm Niederschlag der Jahre 2017/18

	2017	2018
Anzahl [n]	13	17
Niederschlag gefallen [l]	315,3	461,1
mittlerer Cm	0,38	0,56

Im Vergleich zwischen beiden Jahren gab es im Jahr 2018 eine deutliche Erhöhung der Anzahl der größeren Niederschlagsereignisse, bei denen auch ein signifikant höherer Anteil Wasser zum Abfluss kam. Daher konnte das Gründach ähnlich viel Wasser wie im Jahr 2017 ableiten, obwohl insgesamt deutlich weniger Niederschlag gefallen war.

Jahreszeitliche Abflussbeiwerte

Bei der Vergleichenden Betrachtung der Jahreszeitlichen Abflussbeiwerte der Jahre 2017 und 2018 fallen große Diskrepanzen zwischen den berechneten Werten auf. Das Jahr 2019 wird bei dieser Gegenüberstellung außenvorgelassen, da lediglich die Werte für den Frühling vorhanden sind.

Foliendach:

Bei der Betrachtung der Werte für den Frühling fällt die deutliche Änderung der Abflussbeiwerte auf, dieser fiel von 100 % im Jahr 2017 auf 29,9 % im Jahr 2018. Die ca. 70 % Differenz zwischen beiden Werten lässt sich zum einen mit der heißen und trockenen Witterung des Jahres 2018 erklären zum anderen ist dieses Verhalten aber auch von der zeitlichen Abfolge der Niederschläge abhängig. In der nachfolgenden Abbildung sind die Frühlinge der Jahre 2017 und 2018 dargestellt.

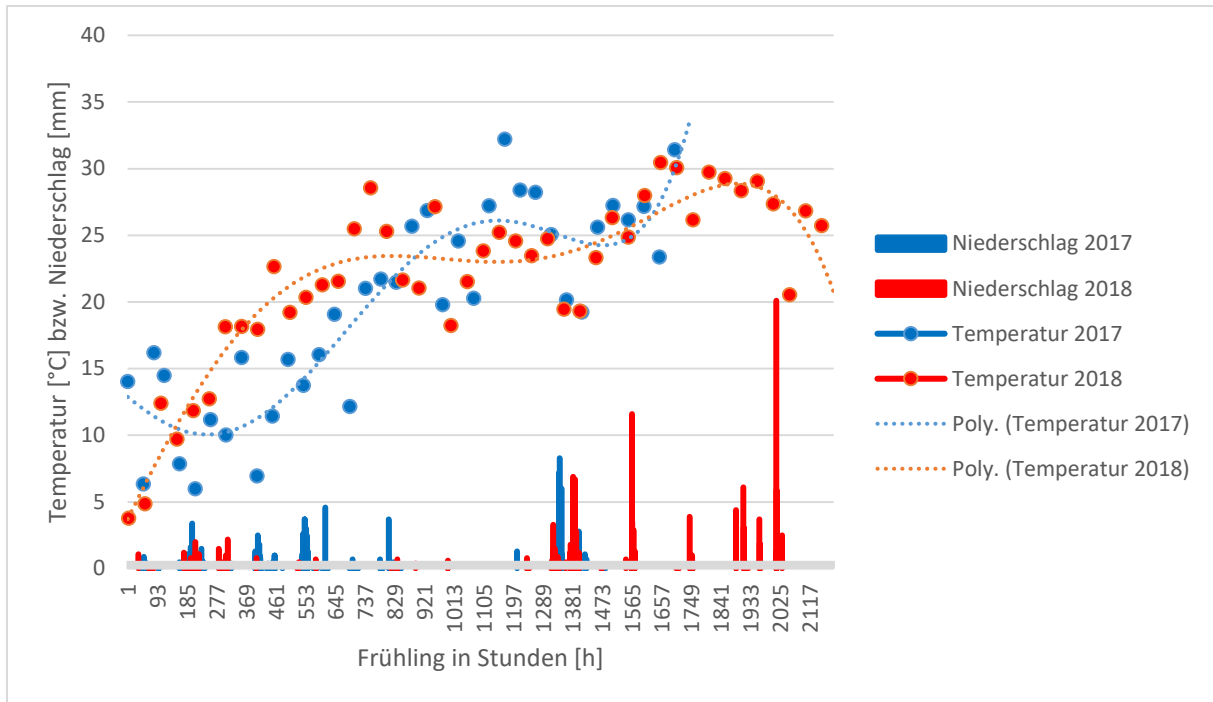


Abbildung 23 3-Tageshöchsttemperaturen – Niederschlagsverteilung Frühling 2017 und Frühling 2018 (eigene Darstellung, 2019)

Im obenstehenden Diagramm ist dargestellt, wann welche Tageshöchsttemperaturen in den Verläufen der beiden Frühlinge erreicht wurden. Für bessere Übersichtlichkeit wurden dafür die Tageshöchsttemperaturen von jeweils drei aneinander liegenden Tagen zusammengefasst. In diesem Diagramm wurden bewusst die Tageshöchsttemperaturen gewählt, da die Verdunstungsraten, die über den Tag hinweg auftreten in dieser Zeit maximal werden. An Tagen mit hohen Tageshöchsttemperaturen kann das Substrat der Vegetationstragschicht mehr austrocknen. Aufgrund der danach vorherrschenden niedrigeren Wassersättigung kann bei einem nachfolgenden Niederschlagsereignis mehr Wasser zurückhalten werden. Zudem ist dargestellt, wann jeweils die Niederschlagsereignisse auftraten, auf der horizontalen Achse sind die Stunden der jeweiligen Jahreszeit aufgetragen.

Es ist zu erkennen, dass der Niederschlag im Jahr 2017 Großteils in einem Zeitraum auftrat, wo die Tageshöchsttemperaturen im Vergleich mit dem Jahr 2018 relativ niedrig waren. Dies erklärt zum Teil, wie ein Abflussbeiwert von 1,0 erreicht werden konnte. Da auch bei niedrigen Außentemperaturen Verdunstungseffekte auftreten, kann davon ausgegangen werden, dass diese Verdunstungsverluste im Jahr 2017 durch eine evtl. eingetretene Schneeschmelze ausgeglichen wurden.

Die Niederschläge im Frühjahr 2018 traten zu einem Zeitpunkt auf, in dem die Tageshöchsttemperaturen mit ca. 30°C recht hoch waren. Aufgrund des thermischen Einflusses erklärt dies die deutlich verminderten Abflüsse vom Foliendach.

Noch deutlicher fallen die Unterschiede zwischen 2017 und 2018 in den Sommermonaten auf. Im Sommer 2018 flossen lediglich 0,4 % der gefallenen Regenmenge ab. Die Gründe hierfür werden im Kapitel 5.2.5 näher betrachtet.

Die Unterschiede im Herbst fallen mit ca. 25 % deutlich geringer als in den Sommermonaten aus. Im Jahr 2018 kam mehr Niederschlag zum Abfluss als im Jahr 2017, obwohl in beiden Jahren etwa gleich viel Niederschlag fiel. Dies liegt wie auch schon in den Frühlingsjahreszeiten an der Niederschlagsverteilung in Verbindung mit den jeweils wirkenden Umgebungstemperaturen. Im Jahr 2017 fiel der Niederschlag relativ kontinuierlich über den Herbst hinweg. Im Jahr 2018 gab es eine Konzentration der Niederschlagsereignisse vor allem im hinteren Drittel des Monats mit 60 % der gesamten Niederschlagsmenge. In diesem hinteren Drittel wirkten deutlich niedrige Tageshöchsttemperaturen. Daher konnte hier mehr Wasser abfließen, da höhere Wassersättigungen in der Vegetationstragschicht vorhanden waren. In der nachfolgenden Abbildung sind die Herbste der beiden Jahre dargestellt.

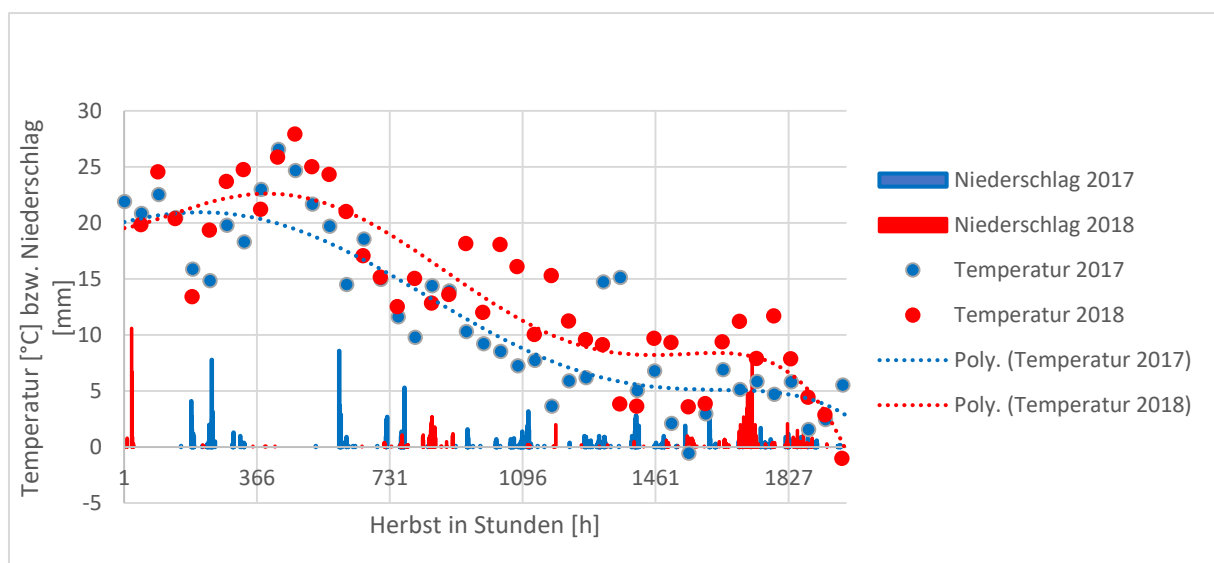


Abbildung 24 3-Tageshöchsttemperaturen – Niederschlagsverteilung Herbst 2017 und Herbst 2018 (eigene Darstellung, 2019)

In den Winterjahreszeiten der Jahre 2017 und 2018 haben sich die Abflussanteile vom Foliendach wieder angeglichen und weisen hier lediglich einen Unterschied von ca. 5% auf.

Gründach:

Beim Gründach fallen die Unterschiede zwischen den beiden betrachteten Jahren geringer aus, hier lassen sich die Unterschiede leichter erklären.

Die Wasserrückhaltefähigkeit eines Bodens hängt vor allem von dessen Vorsättigung mit Wasser ab (KOLB, 2002). Das Jahr 2018 war deutlich wärmer, als das Jahr 2017. Aus diesem Grund waren auch die mittleren Wassersättigungen der Vegetationstragschicht aufgrund von Transpirationseffekten niedriger, als noch im Jahr zuvor. Dies ist im Kapitel 4.2.3 dargestellt. Daher konnte 2018 mehr Niederschlag im Substrat gespeichert werden, bevor es zu einem Abfluss kam.

Ein interessanter Zusammenhang ist, dass das Gründach in den Sommermonaten relativ wenig Niederschlag zum Abfluss bringt, obwohl in dieser Zeit der größte Teil des Jahresniederschlags fällt. Dies korreliert gut mit den vorherrschenden mittleren Wassersättigungen der Vegetationstragschicht, da diese in den Sommermonaten am niedrigsten ist.

5.2.2 Wasserspeicherkapazität und Wassersättigung

Das Vorgehen zur Ermittlung des Sättigungsgewichtes bei 100 % Wassersättigung der Vegetationstragschicht ist aus der FLL-Dachbegrünungsrichtlinie (2018) abgeleitet. Daher wird hier angenommen, dass es in seiner Form verwendet werden kann. Der Wert nach dem letzten messbaren Abfluss vom Gründach wird für die Maximalwerte verwendet, da es dadurch zu einer ausreichend langen Abtropfzeit kommt, die meistens die in der FLL genannten zwei Stunden Abtropfzeit überschreitet. Dadurch kann es unter Umständen dazu kommen, dass niedrigere Werte für das Gewicht bei 100 % Wassersättigung gemessen wurden, als nach dem in der FLL beschriebenen Verfahren gemessen worden wären.

Die Ermittlung des minimalen Gewichtes der Dachbegrünung ist dagegen mit größeren Unsicherheiten verbunden. Das Minimalgewicht kann nur mit einer Trendlinie in Excel abgeschätzt werden. Um prüfen zu können, ob die berechnete Wasserspeicherkapazität von 36,77 Litern realistisch ist, wird dieser Wert nachfolgend mit den Herstellerangaben von *ZinCo* verglichen. Im Anhang unter Kapitel 8.2.2 wird in den Abbildungen 33, 34, 35 und 36 der Systemaufbau Steinrosenflur aus einem *ZinCo* Werbeprospekt, der Systemaufbau der extensiven Dachbegrünung bei *HTI* und zwei Dränschichten dargestellt.

Im *ZinCo* Prospekt wird statt der *Floradrain FD 40* die *Floradrain FD 25* Dränschicht verwendet. Diese weist ein um 2 Liter geringeres Wasserspeichervermögen pro m² auf, als die bei *HTI* verbaute Variante. Bei einer Betrachtung der beiden Vegetationstragschichten, die jeweils 7 cm mächtig sind und aus der Systemerde „Steinrosenflur“ bestehen, kommt heraus, dass die Systemerde im Werbeprospekt von *ZinCo* ein Wasserspeichervolumen von ca. 33 l/m² aufweist. Das im Rahmen dieser Ausarbeitungen berechnete Wasserspeichervolumen der Vegetationstragschicht beläuft sich auf 31,77 l/m². Beide Werte liegen damit lediglich um ca. 4 % auseinander. Da auch die Angabe von *ZinCo* keinen konkreten Wert für die Wasserspeicherkapazität darstellt, dies könnte damit erklärt werden, dass Böden ein natürliches Produkt sind und nicht genormt werden können, wurde der in der Arbeit ermittelte Wert für die Ausarbeitungen verwendet.

Für nachfolgende Arbeiten wird vorgeschlagen, ein definiertes Volumen der Dachbegrünung zu entnehmen und anschließend im Trocknungsofen bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz zu trocknen. Dann würde die Ermittlung des minimalen Gewichtes ohne Unsicherheiten ablaufen.

5.2.3 Ermittlung der mittleren Wassersättigung

Wie zu erwarten war, liegen die Werte der mittleren Wassersättigungen aller Jahreszeiten im Jahr 2018 unter denen des Jahres 2017.

In den Sommer- und Herbstjahreszeiten gab es die größten Unterschiede zwischen den mittleren Sättigungsgraden. Im Sommer lag der Unterschied bei ca. 18 %, was einem Unterschied von 6,6 l/m² entspricht. Im Herbst lag der Unterschied der

Wassersättigung bei ca. 28 % was einem Unterschied im mittleren Wassergehalt von ca. 10 l/m² der Dachbegrünung entspricht.

Die mittlere Wassersättigung im Jahresmittel lag im Jahr 2017 bei 77,60 % und im Jahr 2018 bei 62,06 %. Werden beide Jahre kombiniert betrachtet werden ergibt es einen Mittelwert von ca. 70 %. Daraus lässt sich für das Gründach im Mittel eine verfügbare Wasserspeicherkapazität von ca. 11 l/m² feststellen bevor es zu einem Abfluss kommt. Der Wert von 70 % kann als Grundlage für Berechnungen der Effekte von Gründächern herangezogen werden.

5.2.4 Abflussbeiwerte Cs und Cm

Spitzenabflussbeiwert Cs von Gründach und Foliendach

Bei der Überprüfung der Niederschlagsereignisse, ob eine Bemessungsniederschlagsspende von $r_{(15)} = 300 \text{ l/(s*ha)}$ oder höher erreicht worden ist, stellte sich heraus, dass dies nicht der Fall ist. Bei dieser Umrechnung wurde der bekannte Niederschlagswert aus den Messdaten der Einheit l/(m²*h) auf die Einheit l/(s*ha) bezogen auf 15 Minuten umgerechnet. Daher hätten für den Spitzenabflussbeiwert auch keine genaueren Ergebnisse erzielt werden können, wenn die Daten in höherer zeitlicher Auflösung vorlegen hätten.

Da in den Jahren 2017 und 2018 keine derart großen Regenereignisse auftraten, wurde die Grenze bei der Ermittlung von Cs für die Starkregenereignisse, relativ niedrig angesetzt auf 10 l/(h*m²). Diese Grenze wurde deshalb gezogen, damit wenigstens 7 größere Regenereignisse in die Berechnungen mit eingehen. Bei einer zukünftigen Neuberechnung wird die Datenbasis größer sein und damit auch Cs genauer ermittelbar.

Zudem konnte die Bedingung der vollständigen Wassersättigung der Dachbegrünung vor einem Regenereignis nicht erfüllt werden, dadurch wird der Spitzenabflussbeiwert verfälscht. Da die Dachbegrünung vor Regenereignissen nicht vollständig Wassergesättigt war, müsste dies zu niedrigeren Abflussbeiwerten führen. Dies lässt sich aber aufgrund der zeitlichen Auflösung nicht näher untersuchen.

Problematisch bei dem im Rahmen dieser Arbeit angewandten Verfahren zur Ermittlung der Spitzenabflussbeiwerte ist, dass keine Bemessungsregenspenden untersucht werden konnten. Dies wurde schon im Teil Material und Methoden beschrieben, da Niederschlags und Abflussdaten nur im Abstand von je einer Stunde vorliegen.

Der Spitzenabflussbeiwert ist definiert als Verhältnis der maximalen Abflussspende zur dazugehörigen Regenspende. Daher wäre es sinnvoll Spitzenabflussbeiwerte unter kontrollierten Bedingungen mithilfe von Blockregenereignissen zu bestimmen. Dies könnte mithilfe einer Berechnung des Gründachlysimeters unter Verwendung eines Durchflussbegrenzers erfolgen.

Des Weiteren ist es aufgrund der groben Auflösung Datenpunkten im Abstand von einer Stunde nicht möglich, die maximale Abflussspende zu erfassen. Wie bereits im Kapitel 2.3 beschrieben, tritt die maximale Abflussspende einer Dachbegrünung nach Ende des Regenereignisses auf und flacht anschließend ab. Da für den Spitzenabfluss nach einem Regenereignis nur ein Wert angesetzt werden kann, der eine ganze Stunde umfasst, wird das Ergebnis verfälscht. Deshalb werden zu große Abflussmengen dem Spitzenabfluss zugeordnet. Dies erklärt, warum der im Rahmen dieser Arbeit ermittelte Spitzenabflussbeiwert C_s größer ist, als die in der Literatur verfügbare Werte. Nachfolgend sind die Spitzenabflussbeiwerte für Dachbegrünungen mit einer Aufbaudicke von 10 cm und einem Gefälle von maximal 5 % dargestellt.

Tabelle 19 Literaturwerte für C_s

Literatur:	C_s
SCHACHT (1981)	0,3
KOLB (2002)	0,3
LIESECKE (1998)	0,4
STOVIN (2010)	0,4
FLL DACHBEGRÜNUNGSRICHTLINIEN (2018)	0,4
DIN 1986-100 (2016)	0,4

Aufgrund der oben geschilderten Probleme bei der Ermittlung des Spitzenabflussbeiwertes, liegt der im Rahmen dieser Analyse ermittelte Wert von 0,5 um 0,1 bis 0,2 über den Literaturwerten.

Da lediglich 7 Regenereignisse unbekannter Intensität für die Berechnungen herangezogen werden konnten, ist eine Analyse des jeweiligen Spitzenabflussbeiwertes bezogen auf die Vorsättigung nicht sinnvoll. Es kann aber aus der Tabelle 10 im Kapitel 4.2.4 abgeleitet werden, dass die Spitzenabflussbeiwerte größer werden, je höher die jeweilige Vorsättigung vor dem Regenereignis war.

Der Spitzenabflussbeiwert des Foliendachs liegt wie zu erwarten war bei 1,0.

Mittlerer Abflussbeiwert C_m von Gründach und Foliendach

Gründach:

Tabelle 20 Literaturwerte für C_m bei Gründächern ab 10 cm Aufbau und maximal 5 % Gefälle

Literatur	C_m
DWA-M 153	0,3
UHL und SCHIEDT (2008)	0,32
GREGOIRE (2011)	0,5
FLL (2018)	0,45

Der ermittelte Abflussbeiwert liegt mit 0,5 höher, als die meisten oben gelisteten Werte.

Dies kann in Bezug auf den Wert, der im DWA-M 153 genannt wird, damit erklärt werden, dass die extensive Dachbegrünung mit einer Aufbauhöhe von 11 cm gerade erst in die Kategorie Dachbegrünung ab 10 cm fällt. Sonst würde der Wert von 0,5 mit dem von der DWA in der niedrigeren Kategorie angegebenen Wert von 0,3 übereinstimmen. Der von der DWA angegebene Wert fällt vermutlich so niedrig aus, da bei Dachbegrünungen mit größerer Aufbauhöhe deutlich mehr Regenwasser zurückgehalten werden kann.

Der Abflussbeiwert, der in der FLL-Dachbegrünungsrichtlinie angegeben wird, wurde aus dem dort genannten Jahresabflussbeiwert abgeleitet. Hier wurden alle Regenereignisse ab 0 mm Niederschlag verwendet. Dieser Wert deckt sich mit dem berechneten Wert.

Der Wert von UHL und SCHIEDT fällt geringer aus, da bei deren Versuchen eine Aufbauhöhe der extensiven Dachbegrünung von 15cm verwendet wurde.

Foliendach:

Der für das Foliendach abgeleitete Wert von 1,0 deckt sich mit Literaturangaben. Da bei den meisten Regenereignissen ein Abflussbeiwert von 1,0 aufgetreten ist, scheint es zulässig dies zu verallgemeinern.

Ausnahmen bei den Abflussbeiwerten

Potenzielle Gründe, die dazu führen können, dass weniger Wasser vom Foliendach als vom Gründach abgeleitet wurde werden nachfolgend diskutiert.

Nachfolgend werden Gründe die zur niedrigeren Wasserableitung vom Foliendach als vom Gründach führen könnten diskutiert.

Verstopfung des Abflusses bzw. Fehler bei der Messung:

Im betreffenden Sommerzeitraum 2018 kam es zu Abflüssen vom Foliendach, wenn auch stark reduziert (0,4 % der Niederschlagsmenge). Bei Nachfrage bei Herrn Kiesel von *HTI* wurde verneint, dass Auffälligkeiten bei den Lysimetern im Zuge der beiden jährlichen Begehungen festgestellt werden konnten. Zudem kam es schon im Herbst 2018 zu größeren Abflüssen vom Foliendachlysimeter. Diese entsprachen teilweise der Menge an registriertem Niederschlag durch die Wetterstation, daher ist nicht davon auszugehen, dass an der Messeinrichtung ein Schaden bzw. eine Verstopfung aufgetreten war.

Erhitzung der Oberfläche:

Um nachvollziehen zu können, ob die Erhitzung der Oberfläche einen solchen Effekt bewirken kann, wird nachfolgend für das Niederschlagsereignis vom 05.07.2018 eine Modellrechnung durchgeführt. Dabei soll nur auf das erste Niederschlagsereignis an

diesem betrachteten Tag eingegangen werden, welches den Zeitraum von 14.00 bis 16.00 Uhr umfasst.

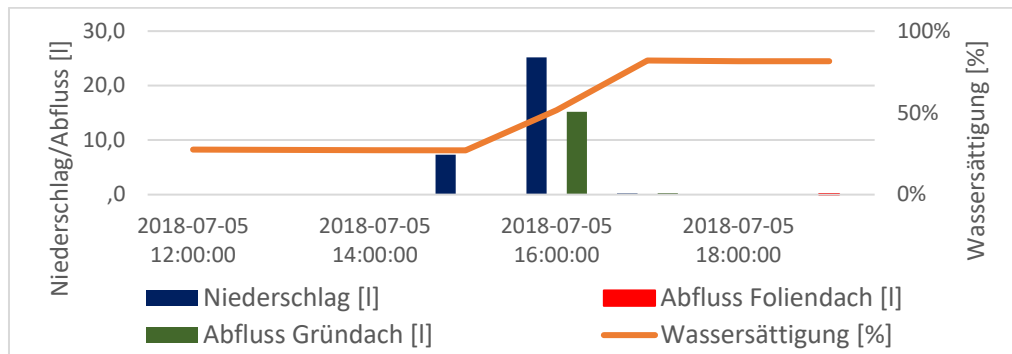


Abbildung 25 Abflussverhalten 05.07.2018 (eigene Darstellung, 2019)

In nachfolgender Tabelle soll berechnet werden, ob die Erhitzung der Oberfläche erklären kann, dass es zu keinem Abfluss der betreffenden Foliendachfläche gekommen ist.

Tabelle 21 Berechnung der benötigten Energie für vollständige Verdunstung

Berechnung	
Fläche [m ²]	1
Menge Wasser [l]	32,7
Annahme: Temperatur Dachoberfläche an einem heißen Hochsommertag	80
Anfangstemperatur Wasser [°C]	20
Temperaturdifferenz	60
Wärmekapazität Wasser [kJ/kg]	4,182
Umrechnungsfaktor kJ → kWh	0,000278
Erwärmungsenergie	= 32,7 * 4,182 * 60 * 0,000278 = 2,2810 kWh
Verdampfungsenthalpie Wasser bei 80°C [kJ/kg]	2,308
Verdampfungsenthalpie	= 32,7 * 2,308 * 0,000278 = 0,0151 kWh
Gesamtenergiebedarf	= 2,2810 + 0,0151 = 2,2961 ≈ 2,3 kWh ≈ 8260 kJ

Wenn am 05.07.2018 das Foliendach ein Energiepotential von mindestens 2,3 kWh/m² bzw. 8260 kJ/m² aufgewiesen hat, ist es möglich, dass die gesamte Regenmenge verdunstet worden ist.

Nach diesen Berechnungen ist es am wahrscheinlichsten, dass die Verdunstung des Niederschlagwassers zu dem geringeren Abfluss führte.

Zu prüfen wäre hier, ob diese Energie wirklich im dünnen Foliendachaufbau gespeichert werden kann. Unterhalb der Dachabdichtung ist eine dünne Lage expandiertes Polystyrol verbaut. Dieses ist von einer 14 cm dicken Einlageboden unterlegt ist, dessen Zusammensetzung unbekannt ist. Eine Abbildung des Aufbaus des Foliendachlysimeters ist im Anhang Kapitel 8.1 in Abb. Nr. 31 dargestellt.

Kam es tatsächlich aufgrund thermischer Effekte der Dachabdichtung zu keinem Abfluss, lässt dies wiederum Rückschlüsse auf die Lebensdauer vom Dach zu. Die schnelle Verdunstung einer größeren Menge Niederschlagswasser führt im Bauwerk zu einem Temperaturschock, welcher die Materialien langfristig schädigen kann. Dies kann auch dazu geführt haben, dass der Lysimeter bereits nach zwei Jahren eine derartige Oberflächenstruktur aufweist. Im Anhang unter Kapitel 8.1 Abbildung Nr. 30 ist dessen Zustand dargestellt.

5.2.5 Schnee Betrachtung

Der bei *HTI* verbaute Dachlysimeter, ist laut E-Mail Mitteilung von Herrn Heerdts von *UGT* kein spezieller Schneelysimeter, dennoch sollen auch die bei *HTI* verbauten Lysimeter in der Lage sein Schnee erfassen zu können.

Als möglichen Grund, weshalb es zu dem eigenartigen Verhalten bei dem Gründachlysimeter kam, wurde die Möglichkeit erwähnt, dass evtl. überhängende Vegetation bei Umgebungstemperaturen von unter 0°C am umgebenden Lysimetergefäß festfriert und sich damit die Gewichtszu- und abnahmen erklären lassen.

Die teilweisen Gewichtsabnahmen beim Foliendachlysimeter lassen sich damit aber nicht erklären. Es kann aber durchaus sein, dass der Effekt des Festfrierens auch hier die Gewichtsveränderungen erklärt.

5.3 Diskussion Raumklima

Die statistischen Auswertungen haben ergeben, dass in fast allen Jahreszeiten ein positiver Effekt der Dachbegrünung auf die Raumtemperaturverhältnisse nachgewiesen werden konnte.

5.3.1 Temperaturzusammenhänge

Die genaue Leistung der Dachbegrünung bezogen auf das Innen-Außen-Temperaturverhältnis kann jedoch nicht ermittelt werden. Dies liegt daran, dass entscheidende Parameter, wie die Oberflächentemperaturen der Innenraumdecke und Dachfläche fehlen, dadurch ist es nicht möglich den genauen Dämmeffekt der Dachbegrünung zu quantifizieren.

Aber die Tatsache, dass die Mittelwerte der Temperaturen sich in 6 von 9 betrachteten Zeiträumen so deutlich unterscheiden, dass von einer Abhängigkeit der Dachbegrünung ausgegangen werden muss, spricht für die Dachbegrünung. Durch Nachrüsten von Oberflächentemperaturmessern wäre es zukünftig möglich die konkrete Dämmwirkung der Dachbegrünung berechnen zu können.

Was in dieser Bachelorarbeit nicht beachtet werden konnte, ist die Fragestellung, ob das Heiz- und Kühlsystem in beiden Räumen wirklich gleich stark arbeitet, da keine Daten darüber vorhanden waren. So ist es theoretisch möglich, dass die statistisch nachgewiesenen Effekte schlussendlich nur darauf zurückzuführen sind.

Problematisch beim Versuchsaufbau war, dass die konventionelle Dachfläche über Raum 2 großflächig durch die Lüftungseinrichtung darüber verschattet war. Bei Raum 1 ist kritisch anzumerken, dass eher die einfach intensive begrünte Fläche über dem Raum liegt, als die extensive Dachbegrünung. Die für Raum 1 erzielten Veränderungen der Raumtemperatur können also eher der einfach intensiven Dachbegrünung gutgeschrieben werden. Bei Raum 2 ist zu prüfen, ob der Einfluss durch die großflächige Beschattung das Ergebnis maßgeblich verfälscht. Dies ist unter Kapitel 3.1.1 Abbildung 8 dargestellt.

5.3.2 Luftfeuchtigkeitsbeziehungen

Wie auch schon bei den Innen-Außen-Temperaturbeziehungen, lässt sich bei den Luftfeuchtigkeitsbeziehungen in 8 von 9 betrachteten Zeitabschnitten ein statistischer Zusammenhang zwischen den Luftfeuchten der beiden Räume und der Dachbegrünung herstellen.

Die geringere relative Luftfeuchtigkeit im Raum 2 rührt daher, da dort i.d.R. höhere Temperaturen auftreten und die Luft somit theoretisch mehr Wasser aufnehmen könnte, weshalb die relative Wassersättigung sinkt. Trotzdem ist auch der absolute Luftwassergehalt in allen Jahreszeiten in Raum 1 größer als in Raum 2.

Es ist auch hier möglich, dass die unterschiedlichen Wassergehalte der Räume auf das Lüftungssystem zurückzuführen sind. Zudem ist auch hier, anzumerken, dass Raum 1 Großteils unter der einfach intensiven Begrünung liegt und Raum 2 großflächig durch die Lüftungseinrichtung darüber verschattet wird.

Als weitere mögliche Fehlerquelle kommt eventuell der Zustand zu tragen, dass für die statistischen Auswertungen die relative Luftfeuchtigkeit und nicht die absolute Luftfeuchtigkeit verwendet wurde.

5.4 Diskussion Modellberechnungen

5.4.1 Diskussion RRB

Die erzielten Ergebnisse der einzelnen Bebauungsvarianten hängen entscheidend von den Grundannahmen der Bebauung/Freiflächen ab. Hier würden je nach Variation der Eingangsparameter sehr unterschiedliche Werte für das notwendige RRB-Volumen herauskommen, daher ist bei realen Projekten immer im Einzelfall zu prüfen, welche Auswirkungen eine großflächige Begrünung mit sich bringen würde.

Aus den berechneten Ergebnissen lässt sich wie zu erwarten war folgern, dass Dachbegrünungen dort am effektivsten sind, wo das Verhältnis aus begrünbaren Dachflächen zur gesamt versiegelten Fläche möglichst groß ist. Bei der hohen

Bebauung ergibt sich ein Verhältniswert von $\frac{A_{D,b}}{A_u} * 100 = 39 \%$. Bei der mittleren Bebauung haben die begrünten Dachflächen einen Anteil von 53%, bei der niedrigen Bebauung von 47%. Daher ist der Effekt der Begrünung in diesen Modellberechnungen im Baugebiet mit der Mittleren Bebauung am größten.

In Abhängigkeit des angesetzten Abflussbeiwertes ergeben sich Volumeneinsparungen des Regenrückhaltebeckens von mindestens 20 %. Aufgrund der Abflusskinetik des Gründachs, wie schon in Kapitel 2.3 beschrieben, sind deutlich größere Einsparungen möglich. Da die Abflussscheitel mit großer zeitlicher Verzögerung abfließen.

5.4.2 Diskussion Einfluss der Verzögerung auf die Abflussspitzen

Bei Variante 2 ist kritisch anzumerken, dass eigentlich nicht die gesamte unbegrünte Fläche mit einem Abflussbeiwert von 1,0 angesetzt werden kann. In der Realität ist auf vielen Gründächern ein Teil dieser nicht begrünten Flächen aus Kies gefertigt, der einen Abflussbeiwert von ca. 0,8 hätte. In dieser Ausarbeitung wurde somit festgeschrieben, dass alle unbegrünten Flächen konventionell befestigte Flächen mit einem Spitzenabflussbeiwert $C_s = 1$ darstellen.

Trotzdem machen die Ergebnisse deutlich, welches Einsparpotential, bei der kompletten Dachentwässerung, begrünte Dächer gegenüber konventionellen Dächern bieten. Hier werden lediglich ca. 1/3 der beim konventionellen Dach benötigten Dachabläufe benötigt, dadurch reduziert sich auch der Umfang an daran angeschlossenen Regensammelleitungen. Durch den wesentlich geringeren Anfall an Wasser kann auch die Grundleitung von DN 600 auf DN 400 verkleinert werden. Dadurch wird die Grundstücksentwässerung deutlich günstiger.

Bei Nachrechnungen, ob die so deutlich verkleinerten Entwässerungsleitungen auch bei Regenereignissen, wo von beiden Teilflächen zusammenfließende Abflüsse zu erwarten sind Entwässerungssicherheit bieten, konnte festgestellt werden, dass keine Überlastungen auftreten.

Hierfür wurden alle von KOSTRA für Weidenbach angegebenen Regenspenden der Wiederkehrzeiten bis $T = 5$ Jahre überprüft.

5.4.3 Diskussion Verdunstung – Urban Heat Island

Bei der Betrachtung der mittleren Verdunstungsraten fällt auf, dass zwischen den Jahren 2017 und 2018 in den Sommer und Winterjahreszeiten große Unterschiede bei den Verdunstungsraten auftreten.

Im Sommer 2018 liegt es daran, dass weniger Niederschlag als im Sommer des Jahres 2017 gefallen ist, der verdunsten konnte.

Die deutliche erhöhte Verdunstungsleistung im Winter des Jahres 2018 verglichen mit dem Jahr 2017 lässt sich mit der um 1 °C erhöhten Umgebungstemperatur erklären. Da der Unterschied zwischen beiden Verdunstungen aber so beachtlich ist, stellt sich die Frage, ob die erhöhten Verdunstungsleistungen im Jahr 2018 nicht auf die fehlerhaften Messergebnisse des Gründachlysimeter zurückzuführen sind, die bei Temperaturen von unter 0 °C auftreten.

Die Energiebilanzen der beiden Jahre unterscheiden sich, wie auch die mittleren Verdunstungsraten, in den Werten für Sommer und Winter. Hierbei sind vor allem die Unterschiede in den Sommerjahreszeiten interessant. Da aktuelle Daten über die Tagesglobalstrahlungen der letzten Jahre nicht zu bekommen waren, konnte hier nur der Vergleich mit dem langjährigen Mittel der Tagesglobalstrahlungen des DWD durchgeführt werden. Das Jahr 2018 war im Vergleich zum Jahr 2017 von Trockenheit und großen Hitzewellen geprägt, dies stimmt mit den Daten in der Hinsicht überein, dass weniger eintreffende Strahlung aufgrund mangelnden Niederschlages in Verdunstungsenergie umgesetzt werden konnte. Dieser Energieüberschuss führte im Gegenzug wieder dazu, dass die mittleren Temperaturen im Sommer 2018 höher lagen als die im Sommer 2017. Dies lässt sich dadurch herleiten, dass die einfallende Strahlung statt in Verdunstung in fühlbare Wärme umgewandelt wurde.

Die errechneten Daten lassen den Schluss zu, dass großflächige Dachbegrünungen in urbanen Gebieten einen deutlich positiven Einfluss auf das Stadtklima bewirken würden. Die konkrete Temperaturabminderung muss mithilfe von Simulationsprogrammen berechnet werden, was im Rahmen dieser Ausarbeitung aber nicht bewerkstelligt werden konnte.

5.5 Diskussion Wirtschaftlichkeitsberechnung

Der Betrachtungszeitraum der dynamischen Kostenvergleichsrechnung ist auf 40 Jahre ausgelegt und betrachtet lediglich die fällig werdende Sanierung des Foliendachs nach 20 Jahren, nicht aber die fällig werdenden Sanierungen des Foliendachs und Gründachs nach 40 Jahren. Dies wurde so gewählt, da der Bauherr nach 40 Jahren die Wahl hat, das Gründach zu sanieren bzw. nach der Sanierung der Dachabdichtung das Dach wieder auf konventionelle Weise abzudichten.

Die gewählten Daten- und Kostengrundlagen beruhen auf Mittellungen der Firma *ZinCo* und Literaturquellen, daher kann nicht gesagt werden, ob die angesetzten Kostengrößen auch bei realen Projekten erzielt werden können. Auch der angesetzte Beitrag von 1,98 €/m²*a der Gemeinde Röttenbach für das Niederschlagswasser hat einen großen Einfluss auf das Ergebnis, da er in jeder Stadt unterschiedlich hoch bemessen ist. Zudem wurden die Kosteneinsparungen durch die Möglichkeit der Verkleinerung des gesamten Entwässerungssystems, wie in Kapitel 4.4.2 berechnet, nicht in der Kostenberechnung verwendet, dadurch wäre die Dachbegrünung noch wirtschaftlicher geworden.

Die Kostenvergleichsrechnung ist daher nur dazu geeignet aufzuzeigen, dass Dachbegrünungen das Potential bieten wirtschaftlich zu sein. Dachbegrünungen sollten daher in Zukunft häufiger verbaut werden, da sie sich mit der Lebensdauer eines Gebäudes amortisieren.

Der gewählte Zuschuss zur Begrünung eines Daches ist in Relation zu den Gesamtkosten sehr gering. Dieser Einfluss würde bei kleinflächigen Begrünungen deutlich größer ausfallen.

Erstaunlich ist, dass die Dachbegrünung, obwohl sie in den Erstinvestitionskosten mit über 280.000 € Mehrkosten zu Buche schlägt am Ende der Lebensdauer einen effektiven „Gewinn“ von 34.000 € nach 40 Jahren erwirtschaftet hat.

Bei dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden nicht monetäre Faktoren nicht betrachtet. Diese sind unter anderem ein möglicher Imagegewinn für ein

Unternehmen durch die Dachbegrünung oder zufriedenerer Mitarbeiter durch die Nähe zu einer Grünfläche.

Abschließend kann zur Dachbegrünung gesagt werden, dass Ausgaben für Umweltschutz und Energieeinsparungen sich durch hohe Erstinvestitionskosten aber einem langfristigen Nutzen auszeichnen. (PFOSER, 2013)

6. Zusammenfassung

Diese Analyse hat das Thema „Auslegung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit einer Dachbegrünung im Vergleich zu einem konventionellen System“. Daraus ergab sich die Forschungsfrage, ob Dachbegrünungen in der Lage sind Städte in verschiedenen Hinsichten auf den immer stärker werdenden Klimawandel vorzubereiten.

Im Bereich der Siedlungsentwässerung sticht die extensive Dachbegrünung mit niedrigen Abflussbeiwerten und einer i.d.R. großen Retention der Niederschlagsabflüsse hervor. Hierdurch kann bei Regenereignissen die anfallende Abwassermenge deutlich reduziert werden, was zu großen Einsparungsmöglichkeiten sowohl bei der Regenwasserableitung als auch der Behandlung führt.

Ob Dachbegrünungen einen konkreten Einfluss auf die Reduktion der Urban Heat Islands haben konnte in dieser Ausarbeitung aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren nicht abschließend geklärt werden. Was aber aufgezeigt werden konnte ist, dass Dachbegrünungen den Anteil an einstrahlender Energie, der in Verdunstung umgesetzt wird, signifikant steigern können. So erhöht sich in einer dicht bebauten Innenstadt der Verdunstungsanteil im Jahresmittel von 2 % auf 10 %. Daraus kann abgeleitet werden, dass es zu einer Temperaturreduktion kommen muss.

Für einen Bauherren der sein Gebäude begrünt konnten verschiedene Vorteile ermittelt werden. Zum einen konnten positiven Effekten auf die Lebensdauer des Daches ermittelt werden. Auch konnten wirtschaftliche Vorteile ermittelt werden. Bei der durchgeführten Amortisationsberechnung führte das Gründach in einem Betrachtungszeitraum von 40 Jahren zu Kosteneinsparungen von ca. 3% gegenüber einem Dach mit einer konventionellen Dachabdichtung. Zudem konnten Zusammenhänge zwischen der Dachbegrünung und dem Raumklima des unterhalb liegenden Raumes hergestellt werden. Hierbei konnte herausgefunden werden, dass das Raumklima fast ganzjährig unterhalb der Dachbegrünung angenehmer, als unter einem Dach mit konventioneller Dachabdichtung ist.

7. Literaturverzeichnis

ATV-DVWK-A 198 (2003):

Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen,
ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V..

BAUMGARTNER, A., H. LIEBSCHER (1996):

Lehrbuch der Hydrologie.- Band 1,
Gebrüder Borntraeger Stuttgart.

Baugesetzbuch (BauGB) (2017):

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV).

BIANCHINI, F. und K, HEWAGE (2012):

Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: a lifecycle approach.,
Build. Environ., 58. pp. 152-162.

BRENNEISEN, S. (2008):

Anwendung eines Modells zu stadtklimatischen Wirkungen von Dachbegrünungen,
6. Internationales FBB-Gründachsymposium.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2011):

Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen,

URL:

https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff_gebauededaten/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen__2011-11-03.pdf [05.06.2019, 18.00 MEZ].

BUCHER, B., H. SCHÄFER (2017):

26.04.2017 Wasserwirtschaftlicher Informationstag Erft Verband.

Bundesverband GebäudeGrün e.V.:

Kosten einer extensiven Dachbegrünung,

URL: <https://www.gebaeudegruen.info/gruen/dachbegruenung/basis-wissen-planungsgrundlagen/faq> [15.07.2019, 16.00 MEZ].

BURK, S. (2019):

Mündliche Mitteilungen,
Mitarbeiter der Firma *ZinCo*

CARTER, T.L., RASMUSSEN, T.C. (2006):

Hydrologic behaviour of green roofs,
Journal of the American Water Resources Association 42

DUNNETT, N., und N. KINGSBURY (2004):

Planting green roofs and living walls,
Timber Press, Inc., Portland, Ore.

DWA-A 117 (2013):

Bemessung von Regenrückhalteräumen,
DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V..

DWA-A 118 (2006):

Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen,
DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V..

DWA-A 531 (2017):

Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer,
DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V..

DWA-M 119 (2016):

Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei
Starkregen,
DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V..

DWA-M 153 (2007):

Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser ,
DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V..

FBB (2017a):

Umfrage gibt es Zuschüsse für Dachbegrünung?,
Fachvereinigung Bauwerksbegrünung (FBB).

FBB (2017b):

Umfrage gesplittete Abwassersatzung?,
Fachvereinigung Bauwerksbegrünung.

Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien)
Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 2005
Kulturbuchverlag Berlin GmbH

Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e.V. (FLL) (2018):
Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen –
Dachbegrünungsrichtlinie,
Bonn.

GEMEINDE RÖTTENBACH (2018):

Beitrags- und Gebührensatzung zur Entwässerungssatzung des Wasser- und
Abwasserzweckverbandes Rezattal (BGS-EWS).

GOLLER, S. (2016):

Werksplanung Dachbegrünung,
Stefan Goller Garten- und Landschaftsarchitektur.

GRAHN, P., und U. STIGSDOTTER (2003):

Landscape planning and stress,
Urban Forestry & Urban Greening, 2 (1), 1-18.

GREGOIRE, B.G., CLAUSEN J.C. (2011):

Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality,
Ecological Engineering 37(6)

GUJER, W. (2007):

Siedlungswasserwirtschaft,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

HafenCity Universität HCU (2017):

Hamburgs Gründächer – Eine ökonomische Bewertung,
Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie (BUE)

HIETEL, E., PANFYOROV, O., RÖßNER, U. (2016):
Extensive Dachbegrünungen im urbanen Raum,
Transforming Cities 1/2016.

HTI Gienger KG (OJ):
Luftbildaufnahme,
URL: <https://www.hti-handel.de/de/unternehmen/hti-gienger/handelszentrum-der-hti-gienger-bayern> [20.06.2019, 13.00 MEZ]

JÄNIKE, K (2017):
Dachbegrünungen Stand der Technik,
Verband Garten-, Landschafts- und Sportplatzbau Nordrhein-Westfalen e.V- VGL NRW.

Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung - Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung
Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung (2010):
Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Kommunikation Berlin.

KOLB, W. (1987a):
Abflussverhältnisse extensiv begrünter Flachdächer – Teil I
Zeitschrift für Vegetationstechnik

KOLB, W. (1987b):
Abflussverhältnisse extensiv begrünter Flachdächer - Teil II
Zeitschrift für Vegetationstechnik

KOLB, W. (1998):
Entlastung von Kanal-Abflussbauwerken durch Gründächer
Dach + Grün

KOLB, W. (1999):
Einfluss der Oberflächenneigung auf die Abflussverhältnisse von Gründächern,
Dach + Grün

KOLB, W. (2002):
Abflussverhältnisse von Gründächern,
Dach + Grün

KOLB, W. (2016):

Dachbegrünung Planung, Ausführung, Pflege,
Eugen Ulmer GmbH, Stuttgart.

KOLB, W., T. SCHWARZ (1999):

Dachbegrünung; intensiv und extensiv,
Eugen Ulmer GmbH, Stuttgart.

KUTTLER, W. (2011a):

Klimawandel im urbanen Bereich Teil 1,
Environmental Sciences Europe.

KUTTLER, W. (2011b):

Klimawandel im urbanen Bereich Teil 2,
Environmental Sciences Europe.

LIESECKE, H. J. (1988):

Untersuchungen zur Wasserrückhaltung extensiv begrünter Flachdächer
Zeitschrift für Vegetationstechnik 2/1988

Matzinger, A., Riechel, M., Remy, C., Schwarzmüller, H., Rouault, P., Schmidt, M.,
Offermann, M., Strehl, C., Nickel, D., Sieker, H., Pallasch, M., Köhler, M., Kaiser, D., Möller,
C., Büter, B., Leßmann, D., von Tils, R., Säumel, I., Pille, L., Winkler, A., Bartel, H., Heise, S.,
Heinzmann, B., Joswig, K., Rehfeld-Klein, M., Reichmann, B. (2017):
Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung – Ergebnisse des
Projektes KURAS. Berlin.

PALMARICCIOTTI, G. (2015):

Abbildung von Extremniederschlägen zur Berechnung des Wasserrückhalte- und
Abflussverhaltens von Dachbegrünung,
13. Internationales FBB-Gründachsymposium.

PAPULA, L. (2011):

Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3,
Vieweg + Teubner

PFOSER, N., JENNER, N., HENRICH, J., HEUSINGER, J. WEBER, S., SCHREINER, J. (2013):

Gebäude Begrünung Energie – Potentiale und Wechselwirkungen,
Technische Universität Darmstadt.

PRETTY, J. (2004):

How nature contributes to mental and physical health,
Spirituality and Health International, 5 (2), 68-78.

RETH, S. (2016):

Angebot Messeinrichtungen,
Umwelt-Geräte-Technik GmbH.

Robert Koch Institut (rki) (2019):

Schätzung der Zahl hitzebedingter Sterbefälle und Betrachtung der Exzess-Mortalität,
Sommer 2018,
Epidemiologisches Bulletin 23/2019.

OHLWEIN, K. (1984):

Dachbegrünungen ökologisch und funktionsgerecht,
Bauverlag GMBH, Wiesbaden und Berlin.

SCHULZE DIECKHOFF, V., BECKER, D., WIECHMANN, T., GREIVING S. (2018):

Raumforschung Raumordnung Spatial Research and Planning,
Springer Berlin Heidelberg

SCHUSTER, H. (2015):

Nur eine Prise Energieeffizienz

URL: https://www.german-architects.com/de/pages/hauptbeitrag/2015_Nur-eine-Prise-Energieeffizienz [11.06.2019, 10.30 MEZ].

SIMMONS, M.T., 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(4)

STOVIN, V. (2010)

The potential of green roofs to manage Urban Stormwater,
Water and Environment Journal.

STOVIN, V., VESUVIANO, G., KASMIN, H. (2012):

The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions.
Journal of hydrology 414

STOVIN, V., POE, S., DE-VILLE, S. BERRETTA, V. (2015):

The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological
performance,
Ecological Engineering 85.

Themenfaltblatt Starkregen und urbane Sturzfluten (2017),
DWA-Landesverband Bayern.

UHL, M., SCHIEDT, L. (2008):

Green Roof Storm Water Retention – Monitoring Results,
11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK

ZINCO GmbH (2018):

Planungshilfe – Systeme für die extensive Dachbegrünung.

ZINZI, M., und S. AGNOLI, (2012):

Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and
mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region.
Energy Build. 66-76

8. Anhang

8.1 Dachflächen und Messeinrichtungen

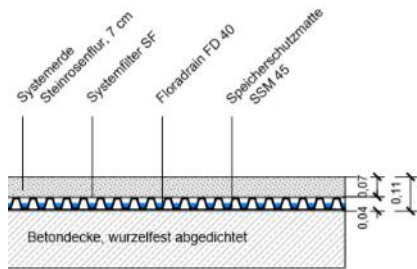


Abbildung 26 Schnitt durch die extensive Begrünung „Steinrosenflur“ (nach GOLLER, 2016)



Abbildung 27 Dachaufsicht HTI-Gienger (eigene Aufnahme, 2019)



Abbildung 28 Zustand extensive Dachbegrünung (eigene Aufnahme, 2019)



Abbildung 29 guter Zustand des Gründachlysimeters (eigene Aufnahme, 2019)



Abbildung 30 Zustand Foliendachlysimeter (eigene Aufnahme, 2019)



Abbildung 31 Schichtaufbau Foliendachlysimeter (eigene Aufnahme, 2019)

8.2 Niederschlag-Abfluss-Verhältnisse

8.2.1 Jahresabflussbeiwert / Jahreszeitlicher Abflussbeiwert

Tabelle 22 Anhaltswerte für den Jahresabflussbeiwert in Abhängigkeit der Aufbaudicke (FLL, 2018)

Nr	1	2	3	4
1	Begrünungsart	Aufbaudicke in cm	Wasserrückhaltung im Jahresmittel in %	Jahresabflussbeiwert ψ_a / Versiegelungsfaktor
2	Extensivbegrünung	2 – 4	40	0,60
		> 4 – 6	45	0,55
		> 6 – 10	50	0,50
		> 10 – 15	55	0,45
		> 15 - 20	60	0,40
3	Intensivbegrünung	15 – 25	60	0,40
		> 25 – 50	70	0,30
		> 50	≥ 90	≤ 0,10
¹⁾ Die Angaben beziehen sich auf Standorte mit 650 – 800 mm Jahresniederschlag und jeweils mehrjährigen Ermittlungen. In Regionen mit geringeren Jahresniederschlägen ist die Wasserrückhaltung höher und in Regionen mit höheren Jahresniederschlägen entsprechend geringer.				

8.2.2 Vorgehen zur Ermittlung der Wasserspeicherkapazität

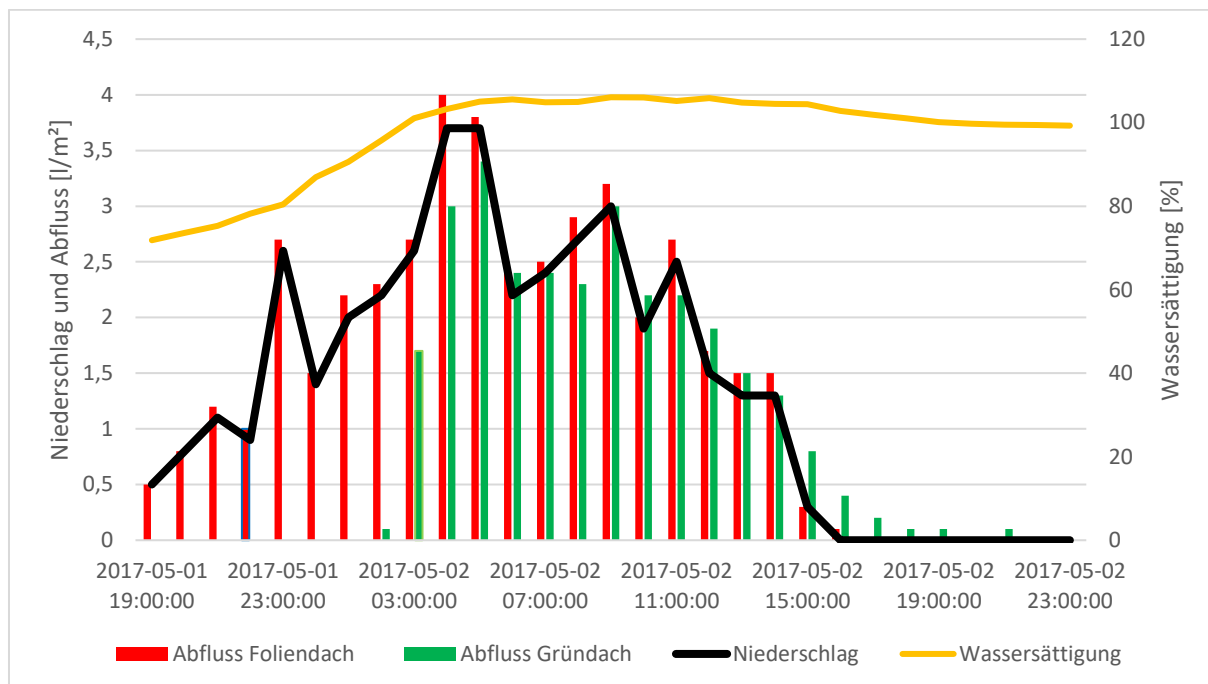


Abbildung 32 Kinetik des Abflussvorgangs bei der extensiven Dachbegrünung (eigene Darstellung, 2019)

Tabelle 23 Vorgehen zur Ermittlung des Vollstättigungsgewichtes

Datum	Niederschlag [mm]	Gewicht Lysimeter Foliendach [kg]	Gewicht Lysimeter Gründach [kg]	Abfluss Foliendach [l]	Abfluss Gründach [l]
2017-05-02 14:00:00	1,3	9,995	163,42	1,3	1,3
2017-05-02 15:00:00	0,3	9,975	163,395	0,3	0,8
2017-05-02 16:00:00	0	9,93	162,815	0,1	0,4
2017-05-02 17:00:00	0	9,875	162,465	0	0,2
2017-05-02 18:00:00	0	9,815	162,145	0	0,1

2017-05-02 19:00:00	0	9,755	161,83	0	0,1
2017-05-02 20:00:00	0	9,74	161,68	0	0
2017-05-02 21:00:00	0	9,745	161,605	0	0,1
2017-05-02 22:00:00	0	9,755	161,56	0	0
2017-05-02 23:00:00	0	9,755	161,515	0	0

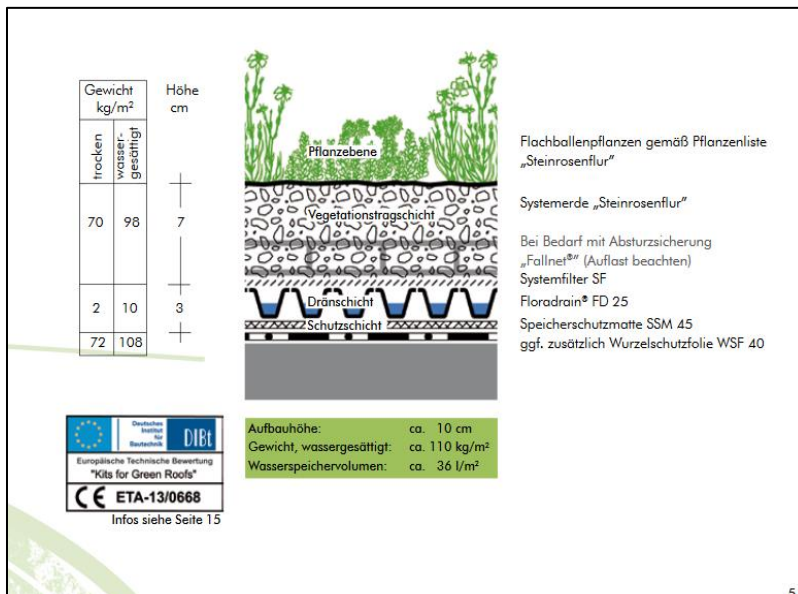


Abbildung 33 Systemaufbau „Steinrosenflur“ (nach ZINCO, 2018)

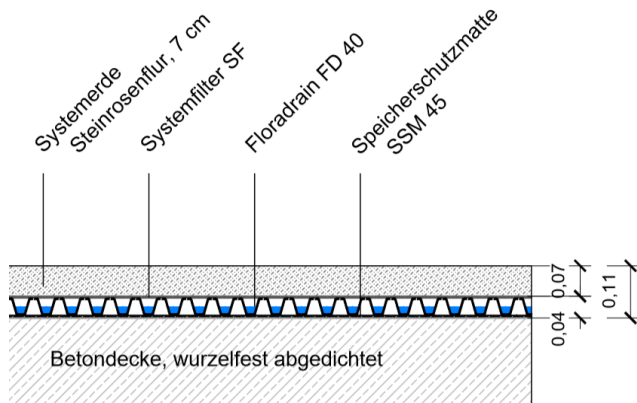


Abbildung 34 Aufbau extensive Dachbegrünung HTI (nach GOLLER, 2016)

Technische Daten

Floradrain® FD 25

Drän- und Wasserspeicherelement aus tiefgezogenem RC-Polyolefin.

Material:	Polyolefin, hauptsächlich PE
Farbe:	dunkelgrau
Höhe:	ca. 25 mm
Flächenmasse:	ca. 1,7 kg/m ²
Durchmesser Diffusionsöffnungen:	ca. 2 mm
Wasserspeichervermögen:	ca. 3 l/m ²
Verfüllvolumen:	ca. 10 l/m ²

Abbildung 35 Technische Daten Floradrain FD 25 (nach ZINCO, 2019)

Technische Daten

Floradrain® FD 40

Drän- und Wasserspeicherelement aus tiefgezogenem RC-Polyolefin.

Material:	Polyolefin, hauptsächlich PE
Farbe:	dunkelgrau
Höhe:	ca. 40 mm
Flächenmasse:	ca. 2,1 kg/m ²
Durchmesser Diffusionsöffnungen:	ca. 2 mm
Wasserspeichervermögen:	ca. 5 l/m ²
Verfüllvolumen:	ca. 17 l/m ²

Abbildung 36 Bei HTI verbaute Dränschicht Floradrain FD 40 (nach ZINCO, 2019)

8.2.3 Abflussbeiwerte Cs und Cm

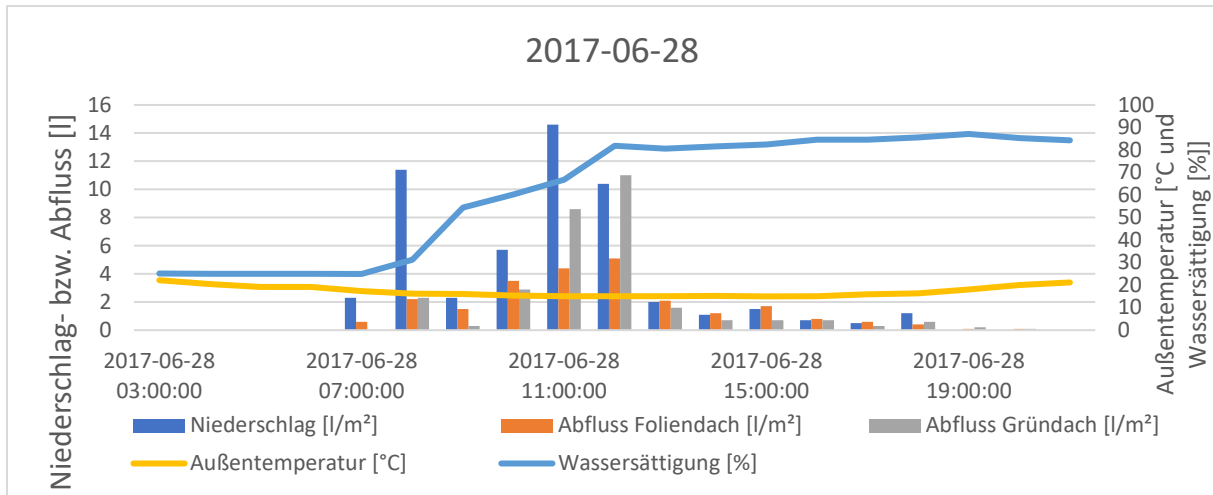


Abbildung 37 höhere Abflussmengen vom Gründach im Vergleich zum Foliendach (eigene Darstellung, 2019)

8.3 Raumklima

Tabelle 24 Ergebnisse der statistischen Auswertung zu den Temperaturzusammenhängen

Statistische Auswertung – Frühling 2017			
	Außentemperatur	Raum 1	Raum 2
Arithmetisches Mittel \bar{x}	13,63	23,57	23,71
Varianz s^2	60,03	1,55	2,12
Standardabweichung s	7,75	1,25	1,46
T-Test		0,001714682 → Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar	

Statistische Auswertung – Frühling 2018			
	Außentemperatur	Raum 1	Raum 2
Arithmetisches Mittel \bar{x}	14,87	23,75	24,00
Varianz s^2	60,69	1,59	1,86
Standardabweichung s	7,79	1,26	1,36
T-Test		3,23347E-10 → Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar	
Statistische Auswertung – Frühling 2019			
	Außentemperatur	Raum 1	Raum 2
Arithmetisches Mittel \bar{x}	12,95	23,59	23,55
Varianz s^2	56,77	0,84	0,82
Standardabweichung s	7,53	0,92	0,9
T-Test		0,2549 → Einfluss der Begrünung statistisch nicht nachweisbar	
Statistische Auswertung – Sommer 2017			
	Außentemperatur	Raum 1	Raum 2
Arithmetisches Mittel \bar{x}	18,46	23,81	24,28
Varianz s^2	39,74	1,20	1,29
Standardabweichung s	6,30	1,09	1,13
T-Test		9,8861E-42 → Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar	
Statistische Auswertung – Sommer 2018			
	Außentemperatur	Raum 1	Raum 2
Arithmetisches Mittel \bar{x}	20,00	25,12	25,58

Varianz s^2	40,20	2,74	3,02
Standardabweichung s	6,34	1,66	1,74
T-Test		1,79388E-19 → Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar	
Statistische Auswertung – Herbst 2017			
	Außentemperatur	Raum 1	Raum 2
Arithmetisches Mittel \bar{x}	6,69	22,13	22,18
Varianz s^2	33,97	1,94	0,54
Standardabweichung s	5,83	1,39	0,74
T-Test		0,156730551 → Einfluss der Begrünung nicht statistisch nachweisbar	
Statistische Auswertung – Herbst 2018			
	Außentemperatur	Raum 1	Raum 2
Arithmetisches Mittel \bar{x}	6,93	22,74	22,82
Varianz s^2	38,96	0,25	0,21
Standardabweichung s	6,24	0,50	0,46
T-Test		0,381175211 → Einfluss der Begrünung nicht statistisch nachweisbar	
Statistische Auswertung – Winter 2017			
	Außentemperatur	Raum 1	Raum 2

Arithmetisches Mittel \bar{x}	1,74	22,90	22,13
Varianz s^2	26,65	3,13	0,69
Standardabweichung s	5,16	1,77	0,83
T-Test		3,38567E-70 → Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar	
Statistische Auswertung – Winter 2018			
	Außentemperatur	Raum 1	Raum 2
Arithmetisches Mittel \bar{x}	2,70	22,63	22,74
Varianz s^2	26,36	1,83	1,70
Standardabweichung s	5,13	1,35	1,30
T-Test		0,01 → Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar	

Tabelle 25 Ergebnisse der statistischen Auswertungen zu den Luftfeuchtigkeitsbeziehungen

Statistische Auswertung Frühling 2017						
	Außenfeuchte relativ	Außenfeuchte absolut [g/m ³]	Raum 1 relativ	Raum 1 Absolut [g/m ³]	Raum 2 relativ	Raum 2 Absolut [g/m ³]
Arithmetisches Mittel	69,69	8,21	35,93	7,63	35,20	7,54
Varianz	549,52		65,32		58,56	
Standardabweichung	23,44		8,08		7,65	
T-Test			0,00587 →Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar			
Statistische Auswertung Frühling 2018						
	Außenfeuchte relativ	Außenfeuchte absolut [g/m ³]	Raum 1 relativ	Raum 1 Absolut [g/m ³]	Raum 2 relativ	Raum 2 Absolut [g/m ³]
Arithmetisches Mittel	68,51	8,71	38,11	8,18	36,97	8,05
Varianz	520,74		82,24		72,22	
Standardabweichung	22,82		9,07		8,50	
T-Test			1,4295E-05 →Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar			

Statistische Auswertung Frühling 2019						
	Außenfeuchte relativ	Außenfeuchte absolut [g/m³]	Raum 1 relativ	Raum 1 Absolut [g/m³]	Raum 2 relativ	Raum 2 Absolut [g/m³]
Arithmetisches Mittel	71,18	8,04	34,99	7,44	34,02	7,22
Varianz	519,2		97,64		83,34	
Standardabweichung	22,79		9,88		9,12	
T-Test			0,0026 →Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar			
Statistische Auswertung Sommer 2017						
	Außenfeuchte relativ	Außenfeuchte absolut [g/m³]	Raum 1 relativ	Raum 1 Absolut [g/m³]	Raum 2 relativ	Raum 2 Absolut [g/m³]
Arithmetisches Mittel	73,28	11,56	49,34	10,62	48,19	10,65
Varianz	475,2		52,56		49,15	
Standardabweichung	1,13		7,25		7,01	
T-Test			1,3514E-07 →Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar			

Statistische Auswertung Sommer 2018						
	Außenfeuchte relativ	Außenfeuchte absolut [g/m ³]	Raum 1 relativ	Raum 1 Absolut [g/m ³]	Raum 2 relativ	Raum 2 Absolut [g/m ³]
Arithmetisches Mittel	66,66	11,51	45,22	10,48	43,48	10,35
Varianz	543,49		59,27		50,82	
Standardabweichung	23,31		7,70		7,13	
T-Test			4,6815E-15 →Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar			
Statistische Auswertung Herbst 2017						
	Außenfeuchte relativ	Außenfeuchte absolut [g/m ³]	Raum 1 relativ	Raum 1 Absolut [g/m ³]	Raum 2 relativ	Raum 2 Absolut [g/m ³]
Arithmetisches Mittel	89,04	6,76 [g/m ³]	36,61	7,16	36,33	7,12
Varianz	191,55		70,82		57,94	
Standardabweichung	13,84		8,41		7,61	
T-Test			0,26767 →Einfluss der Begrünung statistisch nicht nachweisbar			

Statistische Auswertung Herbst 2018						
	Außenfeuchte relativ	Außenfeuchte absolut [g/m ³]	Raum 1 relativ	Raum 1 Absolut [g/m ³]	Raum 2 relativ	Raum 2 Absolut [g/m ³]
Arithmetisches Mittel	86,45	6,67	31,92	6,46	31,10	6,32
Varianz	312,97		57,15		51,54	
Standardabweichung	17,69		7,56		7,20	
T-Test			0,00033 → Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar			
Statistische Auswertung Winter 2017						
	Außenfeuchte relativ	Außenfeuchte absolut [g/m ³]	Raum 1 relativ	Raum 1 Absolut [g/m ³]	Raum 2 relativ	Raum 2 Absolut [g/m ³]
Arithmetisches Mittel	86,80	4,74	25,90	5,29	26,86	5,25
Varianz	220,05		22,99		22,71	
Standardabweichung	14,83		4,79		4,77	
T-Test			8,3705E-11 → Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar			
Statistische Auswertung Winter 2018						

	Außenfeuchte relativ	Außenfeuchte absolut [g/m ³]	Raum 1 relativ	Raum 1 Absolut [g/m ³]	Raum 2 relativ	Raum 2 Absolut [g/m ³]
Arithmetisches Mittel	84,60	4,93	24,36	4,9	23,43	4,74
Varianz	295,45		34,92		29,99	
Standardabweichung	17,19		5,91		5,48	
T-Test			1,1282E-07 →Einfluss der Begrünung statistisch nachweisbar			

8.4 Modellberechnungen

8.4.1 RRB Volumeneinsparpotential

Tabelle 26 Festsetzungen für die verdichtete hohe Innenstadtbebauung

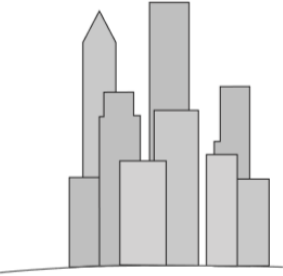
<p>Verdichtete hohe Innenstadtbebauung</p>	 <p>Geprägt durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> • sehr hohem Versiegelungsgrad • sehr viel Verkehr
<p>Flächengröße und - aufteilung</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Flächengröße: 5 ha • Befestigte Flächen $A_{E,b} = 90\%$ • Freiflächen $A_{E,nb} = 10\%$ • Anteil bebaute Flächen: 50% • Anteil Verkehrsfläche: 40% • Anteil Dachflächen: 50% • Begrünbarer Anteil eines Flachdaches: 70% (BRENNEISEN, 2008) • von 30% des Daches normaler Abfluss • Anteil begrünbare Dachflächen: 35%
<p>Abflussbeiwerte</p>	<p>C Verkehrsflächen: 0,9 C Flachdachflächen (nicht begrünt): 1,0 C Dachbegrünung: 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0</p>
<p>Fließzeit</p>	<p>10 Minuten</p>
<p>Wiederkehrintervall des Bemessungsregens</p>	<p>T = 5 a</p>

Tabelle 27 Festsetzungen für die verdichtete mittlere Bebauung



<p>Verdichtete mittlere Bebauung</p>	 <p>Geprägt durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hohem Versiegelungsgrad • Viel Verkehr
<p>Flächengröße und -aufteilung</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Flächengröße: 5 ha • Befestigte Flächen $A_{E,b} = 80\%$ • Freiflächen $A_{E,nb} = 20\%$ • Anteil bebaute Flächen: 60% • Anteil Verkehrsfläche: 20% • Anteil Dachflächen: 60% • Begrünbarer Anteil eines Flachdaches: 70% (BRENNEISEN, 2008) • von 30% des Daches normaler Abfluss • Anteil begrünbare Dachflächen: 42%
<p>Abflussbeiwerte</p>	<p>C Verkehrsflächen: 0,9 C Flachdächer (nicht begrünt): 1,0 C Dachbegrünung: 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0</p>
<p>Fließzeit</p>	<p>10 Minuten</p>
<p>Wiederkehrintervall des Bemessungsregens</p>	<p>$T = 5 \text{ a}$</p>

Tabelle 28 Festsetzungen für die lockere Bebauung

<p>Lockere Bebauung</p>	 <p>Geprägt durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lockere, niedrige Bebauung • Niedriger Versiegelungsgrad • Geringe Verkehrsbelastung
<p>Flächengröße und -aufteilung</p>	<p>Flächengröße: 5 ha Befestigte Flächen $A_{E,b} = 60\%$ Freiflächen $A_{E,nb} = 40\%$ Anteil bebaute Flächen: 40% Anteil Verkehrsfläche: 20% Anteil Dachflächen: 40% Begrünbarer Anteil eines Flachdaches: 70% (BRENNEISEN, 2008) Von 30% des Daches normaler Abfluss Anteil begrünbare Dachflächen: 28%</p>
<p>Abflussbeiwerte</p>	<p>C Verkehrsflächen: 0,9 C Flachdachflächen (nicht begrünt): 1,0 C Dachbegrünung: 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0</p>
<p>Fließzeit</p>	<p>10 Minuten</p>
<p>Wiederkehrintervall des Bemessungsregens</p>	<p>$T = 5 \text{ a}$</p>

Niederschlagshöhen und -spenden nach KOSTRA-DWD 2010																
Rasterfeld		: Spalte 41, Zeile 79														
Ortsname		: Weidenbach (BY)														
Bemerkung		:														
Zeitspanne		: Januar - Dezember														
Dauerstufe	Wiederkehrintervall T [a]															
	1		2		5		10		20		30		50		100	
	hN	rN	hN	rN	hN	rN	hN	rN	hN	rN	hN	rN	hN	rN	hN	rN
5 min	5,4	179,5	7,9	263,4	11,2	374,2	13,7	458,1	16,3	541,9	17,7	591,0	19,6	652,8	22,1	736,7
10 min	8,4	139,4	11,5	191,7	15,7	260,9	18,8	313,2	21,9	365,5	23,8	396,2	26,1	434,7	29,2	487,1
15 min	10,2	113,9	13,8	153,6	18,6	206,1	22,1	245,8	25,7	285,6	27,8	308,8	30,4	338,1	34,0	377,8
20 min	11,6	96,3	15,5	128,9	20,7	172,1	24,6	204,8	28,5	237,4	30,8	256,5	33,7	280,6	37,6	313,3
30 min	13,2	73,6	17,7	98,3	23,6	131,1	28,1	155,9	32,5	180,7	35,1	195,2	38,4	213,5	42,9	238,2
45 min	14,7	54,3	19,7	73,1	26,5	98,0	31,5	116,8	36,6	135,6	39,6	146,6	43,3	160,5	48,4	179,3
60 min	15,5	43,1	21,1	58,5	28,4	79,0	34,0	94,4	39,6	109,9	42,8	119,0	46,9	130,4	52,5	145,8
90 min	17,0	31,4	22,6	41,8	30,0	55,5	35,5	65,8	41,1	76,2	44,4	82,3	48,5	89,9	54,1	100,2
2 h	18,1	25,1	23,7	32,9	31,1	43,2	36,7	51,0	42,3	58,8	45,6	63,4	49,8	69,1	55,4	76,9
3 h	19,8	18,3	25,4	23,6	32,9	30,5	38,5	35,7	44,2	40,9	47,5	43,9	51,6	47,8	57,2	53,0
4 h	21,1	14,7	26,8	18,6	34,2	23,8	39,9	27,7	45,6	31,6	48,9	33,9	53,0	36,8	58,7	40,7
6 h	23,1	10,7	28,8	13,3	36,3	16,8	42,0	19,4	47,7	22,1	51,0	23,6	55,2	25,5	60,8	28,2
9 h	25,3	7,8	31,0	9,6	38,6	11,9	44,3	13,7	50,0	15,4	53,3	16,5	57,5	17,7	63,2	19,5
12 h	27,0	6,2	32,7	7,6	40,3	9,3	46,0	10,6	51,7	12,0	55,1	12,7	59,3	13,7	65,0	15,0
18 h	30,7	4,7	37,2	5,7	45,9	7,1	52,5	8,1	59,0	9,1	62,8	9,7	67,7	10,4	74,2	11,5
24 h	33,6	3,9	40,7	4,7	50,2	5,8	57,3	6,6	64,5	7,5	68,7	7,9	73,9	8,6	81,1	9,4
48 h	41,8	2,4	50,4	2,9	61,7	3,6	70,3	4,1	78,9	4,6	83,9	4,9	90,2	5,2	98,8	5,7
72 h	47,5	1,8	56,9	2,2	69,3	2,7	78,8	3,0	88,2	3,4	93,7	3,6	100,6	3,9	110,0	4,2

Legende

T Wiederkehrintervall, Jährlichkeit in [a]: mittlere Zeitspanne, in der ein Ereignis einen Wert einmal erreicht oder überschreitet

D Dauerstufe in [min, h]: definierte Niederschlagsdauer einschließlich Unterbrechungen

hN Niederschlagshöhe in [mm]

rN Niederschlagsspende in [l/(s·ha)]

Abbildung 38 KOSTRA Daten für Weidenbach (nach DWD, 2010)

8.4.2 Quantifizierung der Verdunstungsmenge

Tabelle 29 Mittlere Verdunstungsraten der extensiven Dachbegrünung im Jahresgang

Mittlere Verdunstungsraten						
Jahr	2017		2018		2019	
Jahreszeit	Mittlere Verdunstung [l/h]	Mittlere Temperatur [°C]	Mittlere Verdunstung [l/h]	Mittlere Temperatur [°C]	Mittlere Verdunstung [l/h]	Mittlere Temperatur [°C]
Frühling	0,06613	13,63	0,06371	14,87	0,06200	12,95
Sommer	0,07565	18,46	0,05559	20,00	-	-
Herbst	0,02310	6,69	0,02621	6,93	-	-
Winter	0,00205	1,74	0,01545	2,70	-	-

Tabelle 30 Energiebilanzen bezogen auf 1 m² Dachbegrünung

		2017	2018	2019
Frühling	Energie für Verdunstung [kWh/d]	1,08	1,04	1,01
	Langjährige mittlere Globalstrahlung [kWh/d]	4,12	4,12	4,12
	Anteil der einstrahlenden Energie, der für Verdunstung benötigt wird	26,18 %	25,22 %	24,55 %

Sommer	Energie für Verdunstung [kWh/d]	1,23	0,91	-
	Langjährige mittlere Globalstrahlung [kWh/d]	4,62	4,62	-
	Anteil der einstrahlenden Energie, der für Verdunstung benötigt wird	26,72 %	19,63 %	-
Herbst	Energie für Verdunstung [kWh/d]	0,38	0,43	-
	Langjährige mittlere Globalstrahlung [kWh/d]	1,58	1,58	-
	Anteil der einstrahlenden Energie, der für Verdunstung benötigt wird	23,80 %	27,00 %	-
Winter	Energie für Verdunstung [kWh/d]	0,03	0,25	-
	Langjährige mittlere Globalstrahlung [kWh/d]	1,32	1,32	-
	Anteil der einstrahlenden Energie, der für Verdunstung benötigt wird	2,53 %	19,08 %	-

Erklärung

Verfasser/in Haus, Johannes

Betreuer/in Prof. Dr.-Ing. Oliver Christ

Thema der Arbeit Auslegung Betrieb und Wirtschaftlichkeit einer Dachbegrünung im

Vergleich zu einem konventionellen System am Beispiel des

Neubaus des Handelszentrum der HTI in Röttenbach

Ich erkläre hiermit, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig zu Prüfungszwecken vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Ort	Datum	Unterschrift Verfasser

Erklärung bzgl. der Zugänglichkeit von Diplom-/Bachelor-/Masterarbeiten

Verfasser/in (Name, Vorname): _____

Betreuer/in (Name, Vorname): _____

Thema der Arbeit: _____

Ich bin damit einverstanden, dass die von mir angefertigte Arbeit mit o.g. Titel innerhalb des Bibliothekssystems der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf aufgestellt und damit einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird. Die Arbeit darf im Bibliothekskatalog der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (und zugeordneten Verbundkatalogen) nachgewiesen werden und steht allen Nutzern der Bibliothek entsprechend den jeweils gültigen Nutzungsmodalitäten der Hochschulbibliothek der HSWT zur Verfügung. Ich bin mir auch darüber im Klaren, dass die Arbeit damit von Dritten ohne mein Wissen kopiert werden kann.

Die Veröffentlichung der Arbeit habe ich mit meinem Betreuer und falls zutreffend, mit der Firma/Institution abgesprochen, die eine Mitbetreuung übernommen hatte.

<input type="checkbox"/>	Ja
<input type="checkbox"/>	Ja, nach Ablauf einer Sperrfrist von _____ Jahren
<input type="checkbox"/>	Nein

Ort	Datum	Unterschrift Verfasser

Fachgebiet:

Umweltsicherung

- Abfall
- Boden
- Wasser
- Analytik, Mikrobiologie
- Ökologie & Naturschutz
- Umwelttechnik, EDV
- Verwaltung, Recht, Wirtschaft
- Umweltmanagement
- Erneuerbare Energien

- Ernährung und Versorgungsmanagement
- Lebensmittelmanagement

Master:

- Energiemanagement und Energietechnik
- MBA Agrarmanagement
- MBA Regionalmanagement

Landwirtschaft

- Pflanzliche Erzeugung
- Tierische Erzeugung
- Agrarökonomie
- Landtechnik
- Erneuerbare Energien
- Agrarökologie
- Vieh und Fleisch

Als Betreuer bin ich mit der Aufnahme in das Bibliothekssystem der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf einverstanden.

Ort	Datum	Unterschrift Betreuer