

Technische Universität Dresden

## **Modellprojekt Integrales Wassermanagement**

Untersuchungen zur Optimierung der Effekte Einfacher  
Intensivdachbegrünung auf Gebäude- und Stadtklima,  
Wasserhaushalt und Vegetationsvielfalt im urbanen Umfeld  
durch Bewässerung mit aufbereitetem Grauwasser

### **Abschlussbericht**

3. Band

über das unter dem AZ: 35353/01-23  
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt  
geförderte Forschungsprojekt

von

Professur für Landschaftsbau  
Professur für Siedlungswasserwirtschaft  
Professur für Bauphysik  
Professur für Meteorologie

Dresden, 13. September 2023

# Impressum

## **Öffentlichkeitsarbeit (Arbeitspaket 1):**

### **Professur für Landschaftsbau**

Autor:Innen: Prof. Dipl.-Ing. Irene Lohaus  
Dipl.-Ing. Sören Meyer  
Richard Walter M.Sc.

## **Vitalität und Ästhetik (Arbeitspaket 2):**

### **Professur für Landschaftsbau**

Autor:Innen: Prof. Dipl.-Ing. Irene Lohaus  
Dipl.-Ing. Sören Meyer  
Richard Walter M.Sc.

## **Wasserbilanz, Stoffbilanz und Abflussprozesse (Arbeitspaket 3):**

### **Professur für Siedlungswasserwirtschaft**

Autor:Innen: Dipl.-Ing., Dipl.-Hydrol. Björn Helm  
Laura Elisa Herr M.Sc.

## **Bauklimatische Untersuchung des Kühlpotenzials (Arbeitspaket 4):**

### **Professur für Bauklimatik**

Bearbeiter:innen: Dr.-Ing. Peggy Freudenberg (Datenauswertung, Datenvisualisierung, Konzeption),  
Philipp Hänicke (Dokumentation Sensorik, Auswertungsansätze),  
Jovanka Kuzmanovska B.Sc. (Datenauswertung),  
Dipl.-Ing. Hans Petzold (Labormessungen Wärmeleitfähigkeit)

Autorin: Dr.-Ing. Peggy Freudenberg

## **Stadtklimatische Bewertung des Kühlpotenzials (Arbeitspaket 5):**

### **Professur für Meteorologie**

Autor: Dr. Valeri Goldberg

## **Botanischer Garten der TU Dresden (Projektbeteiligter Kooperationspartner)**

*Alle Abbildungen und Tabellen sind, sofern nicht anders angegeben, eigene Darstellungen der Verfasser:innen.*

13. September 2023

Elektronische Fassung des Abschlussberichts erhältlich über:

Technische Universität Dresden, Institut Landschaftsarchitektur, Professur für Landschaftsbau  
Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden

Tel.: 0351-463 34447, Mail: landschaftsbau@tu-dresden.de

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



|                               |  |                    |                                      |                    |              |
|-------------------------------|--|--------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------|
| <b>Az</b>                     | 35353/01   | <b>Referat</b>     | 167                                  | <b>Fördersumme</b> | 121.748,00 € |
| <b>Antragstitel</b>           | Optimierung der Effekte Einfacher Intensivdachbegrünung auf Gebäude- und Stadtklima, Wasserhaushalt und Vegetationsvielfalt im urbanen Umfeld durch Bewässerung mit aufbereitetem Grauwasser |                    |                                      |                    |              |
| <b>Stichworte</b>             | Klimaschutz, Ressourcenschonung, Umweltforschung, Umwelttechnik  |                    |                                      |                    |              |
| <b>Laufzeit</b>               | <b>Projektbeginn</b>   | <b>Projektende</b> | <b>Projektphase(n)</b>               |                    |              |
| 42 Monate                     | 16.12.2019   | 30.06.2023         |                                      |                    |              |
| <b>Zwischenberichte</b>       | 1. Zwischenbericht (19. 08. 2021), 2. Zwischenbericht (05.10.2022)   |                    |                                      |                    |              |
| <b>Bewilligungs-empfänger</b> | Technische Universität Dresden,<br>Fakultät Architektur, Institut Landschaftsarchitektur,<br>Professur für Landschaftsbau, Prof. Irene Lohaus  |                    | Tel<br>+49351463-34447               |                    |              |
|                               | Professur für Siedlungswasserwirtschaft, TU Dresden  |                    | Projektleitung<br>Prof. Irene Lohaus |                    |              |
|                               | Professur für Meteorologie, TU Dresden<br>Professur für Bauklimatik, TU Dresden<br>Botanischer Garten der TU Dresden   |                    | Bearbeiter<br>Richard Walter         |                    |              |
| <b>Kooperationspartner</b>    |  |                    |                                      |                    |              |

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Gründächer können zur Verbesserung des thermischen Milieus in Stadtgebieten beitragen, wobei der Kühleffekt durch Evapotranspiration ein wichtiger Teilaspekt ist. Die Nutzung dieser Verdunstungsleistung in längeren Trocken- und Hitzeperioden ist bei geringschichtigen Begrünungsformen bedingt durch limitiertes Retentionsvermögens stark eingeschränkt. Eine Anpassung des Schichtaufbaus hin zu größeren Aufbauhöhen sowie eine ergänzende Bewässerung können diesem Umstand entgegenwirken. Die Verwendung von Trinkwasser für die Bewässerung ist dabei jedoch weder nachhaltig noch ökonomisch sinnvoll.

Ziel des Projektes ist zu untersuchen, ob sich die prognostizierten bzw. unter unterschiedlichen Versuchsbedingungen in vorangegangenen Forschungsprojekten sektoral und für Extensivbegrünungen nachgewiesenen Effekte für eine einfache Intensivbegrünung in einer typischen, gebauten Dachbegrünungssituation unter realen klimatischen Bedingungen durch eine Bewässerung mit aufbereitetem Grauwasser verstetigen und optimieren lassen. Der Fokus liegt auf der Untersuchung der erforderlichen Quantitäten zur Erzielung möglichst großer Synergien der Effekte bzw. zur möglichen Optimierung eines Teilaspektes nach Bedarf im Anwendungsfall.

Hierfür wird in Langzeitversuchen eine einfache Intensivdachbegrünung unter realen Einbau-, unterschiedlichen Betriebsbedingungen und dem Einfluss wechselnder hydraulischer Belastungen untersucht. Mit dem Einsatz von vorbehandeltem Grauwasser als nachhaltige Bewässerungsoption wird darüber hinaus die durch den Stoffeintrag bedingte Einflussnahme auf die Leistungsfähigkeit des Bodenkörpers beschrieben. Mit den Versuchen soll eine eigene Datengrundlage aufgebaut und bereits vorhandene, unter Laborbedingungen gewonnenen Forschungsergebnisse validiert und ggf. ergänzt werden.

Die Ergebnisse sollen in der Zusammenschau Auskunft über den Umfang der Auswirkung von Bewässerung auf das Retentionsvermögen, das Evapotranspirationspotential und die Bauklimatik sowie das Erscheinungsbild von Gründächern mit einfacher Intensivbegrünung geben. Für die prognostizierte Entwicklung der klimatischen Gegebenheiten in Städten will das Projekt Ansätze zum Erhalt der Vitalität und dem optimierten Beitrag zu Stadtklima und Urbanhydrologie von Gründächern entwickeln. Die Besonderheit des Forschungsansatzes liegt in der Untersuchung und Auswertung aller Teilaspekte in einer Anlage, welche die Identifikation von Synergien und Divergenzen zwischen den genannten Potentialen und Einflussfaktoren ermöglicht.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Die 21 je 3,5 m<sup>2</sup> großen Versuchsflächen in drei Expositionssituationen wurden im Frühjahr 2020 hergestellt und bepflanzt und zur Erfassung des zulaufenden Wassers, der Wassergehalte im Dachsubstrat sowie des Überlaufs mit Sensoren ausgestattet. Zusätzlich werden die Temperaturen an der Dachhaut, in verschiedenen Niveaus des Gründachaufbaus und des Pflanzenbestandes erfasst. Eine Klimastation stellt Informationen zu Niederschlag und verdunstungsrelevanten atmosphärischen Messgrößen bereit, ein Infrarotsensor erfasst Wärmeströme der Pflanzung auf dem Dach. Die Wasserqualität im Zulauf und Ablauf des Daches sowie im Substrat werden regelmäßig sowie ereignisbezogen beprobt.

Im Arbeitspaket 2 Vitalität und Ästhetik wird der Zustand der Vegetation in den Forschungsfeldern im zweiwöchentlichen Turnus erfasst und dokumentiert. Veränderliche vegetationsphysiologische Parameter werden über Boniturbögen erfasst und bewertet. Im Ergebnis können Rückschlüsse auf Vitalität und ästhetisches Erscheinungsbild wie z.B. Blüten-, Blatt- und Volumenentwicklung bei unterschiedlichen Bewässerungsregimen gezogen werden

Im Arbeitspaket 3 Wasserbilanz, Stoffbilanz und Abflussprozesse wird eine Langzeit- und Intensivmesskampagne von Zu-/ Ablaufkonzentrationen der Wasserqualitätsparameter durchgeführt und ausgewertet. Darüber hinaus werden die Messungen inkl. hydraulische und stoffliche Bilanzierung, Reinigungsleistung und Mengenbilanzierung (Stundenwerte, Niederschlagsanteil, Grauwasser-aufkommen) ausgewertet.

Im Arbeitspaket 4 Bauklimatische Untersuchung des Kühlpotenzials werden aufbauend auf einer Laboranalyse verbauter Materialien der Versuchsflächen ein Hygrothermisches Monitoring durchgeführt. Dazu werden die Randbedingungen und ausgewählte Messdaten innerhalb der Konstruktionen für Nachrechnungen mit der Simulationssoftware DELPHIN aufgenommen und dokumentiert sowie die Wärmestrommessungen durchgeführt und analysiert. Weiterhin erfolgt an Hand der erfassten Messdaten eine vergleichende Abschätzung des Kühlpotenzials der einfachen intensiven Dachbegrünung bei den verschiedenen Bewässerungsregimen.

Im Arbeitspaket 5 Stadtklimatische Bewertung des Kühlpotenzials erfolgt eine Analyse der stationären Klimamessungen im Umfeld des Gründachs sowie mobile Klimamessungen zur raum-zeitlichen Verdichtung der stationären Messungen. Unter anderem werden der Zusammenhang von Gründachbewässerung, Pflanzenbewuchs und Oberflächentemperatur untersucht, aber gleichermaßen auch z.B. der Einfluss der Bewölkung und des Gebäudeschattens ausgewertet.

### ***Ergebnisse und Diskussion***

Arbeitspaket 2 Vitalität und Ästhetik

In der dem Bericht zu Grunde liegenden Auswertung der Vegetationsperiode 2022 erzielten sämtliche ausgewerteten Parameter wie z.B. Gesamterscheinungsbild, Deckungsgrad, Blütenmenge und

Blattgröße in Feldern mit maximalem Bewässerungsregime (2,4 mm/d) die besten Bewertungen. Auch die minimal (0,6 mm/d) bewässerten Felder zeigen jedoch durchgängig mindestens ein mittleres Erscheinungsbild bei überwiegend grünem Blattwerk und überstehen Trocken- und Hitzeperioden, wenn auch mit deutlichen Einbußen z.B. in Bezug auf den Deckungsgrad (62 % gegenüber 95 % bei maximaler Bewässerung). In der Auswertung wurde deutlich, dass keine Linearität zwischen Vitalität und Bewässerungsmenge besteht, sondern mit der medialen Bewässerung (Regime Medial = 1,2 mm/d) Bewertungen erzielt werden konnten, welche z.T. nur leicht hinter der maximalen Bewässerung zurücklag.

Mit den erhöhten Bewässerungsmengen konnten artspezifisch gesteigerte Wuchshöhen festgestellt werden. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das verdunstende Vegetationsvolumen proportional mit der Bewässerungsmenge steigt. Bei den in den Sommermonaten blühenden Arten, wie z.B. Bistorta, wurden wesentlich größere Blütenmengen in den maximal bewässerten Feldern festgestellt, als in denen mit minimaler Bewässerung (durchschnittlich 3 Stufen bessere Bewertung). Demgegenüber zeigen die mit vermeintlich trockenheitsverträglichen Arten bepflanzten Nebenflächen im heißen und trockenen Sommer 2022 bereits im Juni überwiegend braunes Blattwerk sowie ein Ausbleiben weiterer Blütenentwicklung. Die Bewässerung führt demnach zu einem ästhetischen Mehrwert und gleichermaßen ist in den Sommermonaten von einem erhöhten Nahrungsangebot für Insekten auszugehen.

#### Arbeitspaket 3 Wasserbilanz, Stoffbilanz und Abflussprozesse

Dachbegrünungen weisen auf Grund der geringen Substratdicke und der guten Wasserleitfähigkeit nur eine begrenzte Speicherkapazität auf. Dadurch ist auch die Wasserverfügbarkeit in Trockenperioden limitiert. Die Bewässerung ermöglicht es, die Verdunstungsleistung von Dachbegrünungen deutlich zu steigern und diese Komponente des Wasserhaushalts an natürliche Flächen anzunähern. Die untersuchten Bewässerungsmengen wurden in Trockenperioden weitgehend verdunstungswirksam. Bei Bewässerungsmengen von 5 mm/d entstanden auch bei ungesättigten Substraten Abflüsse, so dass bei dem verwendeten typischen Dachbegrünungssubstrat häufige geringe Bewässerungsgaben empfehlenswert sind. Die Messung des Wassergehaltes in Dachsubstraten und der Abflusssdynamik für die Messfelder erwies sich als herausfordernd und erfordert weitere Untersuchungen zur Sensorauswahl.

Die erhöhten Wassergehalte in Folge der Bewässerung bewirken gleichzeitig eine geminderte Speicherverfügbarkeit bei Regenereignissen und in Folge erhöhte Abflussvolumen und Spitzenabflüsse. Diese treten allerdings bei kurzen Trockenperioden zwischen Regenereignissen und im Winterhalbjahr auch ohne Bewässerung auf. Dadurch ist die systematische Abminderung des Spitzenabflusses von Dachbegrünungen limitiert und sollte nicht pauschal angesetzt werden.

Die Konzentration von organischen Stoffen und Stickstoffkomponenten lag im Ablaufwasser der Dachbegrünungen signifikant über den Werten im unbehandeltem Grauwasser und Bewässerungswasser. In Bezug auf die Stoffkonzentrationen muss der Ablauf der Dachbegrünungen also als Eintragsquelle angesehen werden. Verschiedene Prozesse können die hohen Ablaufkonzentrationen verursachen: durch die Verdunstung werden mit dem Bewässerungswasser aufgebraachte Stoffe aufkonzentriert und bei Regenereignissen ausgetragen. Pflanzenwachstum und -metabolismus setzen organische Stoffe frei, die aus dem Substrat ausgespült werden und schließlich stellen die Kompostanteile in der Substratmischung selbst eine Quelle für organische Verbindungen und Stickstoff dar. Die Bedeutung dieser Prozesse und die Frachtbezogene Betrachtung der stofflichen Belastung sollen in zukünftigen Projekten untersucht werden.

#### Arbeitspaket 4 Bauklimatische Untersuchung des Kühlpotenzials

Die bauklimatischen Analysen fokussierten zunächst auf den Einfluss der unterschiedlichen Konstellationen von Gründachaufbauten und Bewässerungsformen auf den Feuchte- und Wärmehaushalt innerhalb der Konstruktionen. Auch aus diesen Analysen konnte geschlussfolgert

werden, dass die temperatenausgleichende und temperaturabsenkende Wirkung einer verstärkten Bewässerung im medialen Bewässerungsregime mit den vorhandenen Standortbedingungen eine große Verbesserung gegenüber dem minimalen Bewässerungsregime aufweist und für die maximale Bewässerung nur noch geringe Performance-Steigerungen vorhanden waren. Zwei Effekte sind für die Kühlwirkung von Gründächern maßgebend, erstens die deutlich gesteigerte Wärmespeicherfähigkeit in Folge des erhöhten Wassergehaltes. Diese führt zu einer erheblichen Amplitudendämpfung in der Dachkonstruktion mit einer resultierenden Temperaturabsenkung tagsüber von ca. 13°C im Mittel des Monats August 2022 des maximal bewässerten gegenüber dem nicht bewässerten extensiv begrünten Feld. Zweitens führt die Evapotranspiration der Pflanzen zu einer permanenten Temperaturabsenkung des Feldes von ca. 2°C im Mittel des Monats August 2022. Diese Temperaturabsenkung ist jedoch keine alleinige Konsequenz der Evapotranspiration, sondern auch Folge einer veränderten Strahlungsbilanz. So ist der kurzweilige Strahlungseintrag in die Substratschicht bei vitaler Bepflanzung und hohem Pflanzenbedeckungsgrad erheblich reduziert, gleiches gilt für die langweilige Abstrahlung. Hier ist auch zu berücksichtigen, dass das vitale Blätterdach eine Schutzebene für die Verdunstung von der Substratoberfläche bildet und damit dem Erhalt eines hohen Wassergehaltes im Substrat zuträglich ist. „Ungeachtet dessen ist der Einfluss der erhöhten Wärmespeicherfähigkeit der dominante Kühleffekt bei bewässerten Gründächern. Er nimmt zusätzlich auch einen Einfluss auf das Frostbildungsrisiko, welches mit zunehmendem Wassergehalt erheblich reduziert ist. So zeigen sämtliche Dachflächen mit Bewässerung innerhalb der Konstruktion keine Temperaturen unter der Frostgrenze. Eine Abbildung dieser Effekte im hygrothermischen Modell war mit den bisherigen Modellen noch nicht möglich. Hier besteht Forschungsbedarf. Die lose Struktur des Substrates stellt eine Herausforderung für die Modellierung von Speicher- und Transporteigenschaften dar, die feuchtegehaltsabhängige Evapotranspiration stellt eine weitere Hürde dar. So existieren aktuell nur stark vereinfachte Evapotranspirations-Modelle, welche den Zeitverlauf des Wassergehaltes vernachlässigen und permanente Wasserverfügbarkeit annehmen. Auch hier besteht Forschungsbedarf.

#### Arbeitspaket 5

Die Mikroklimauntersuchungen auf dem Gründach zeigen einen klaren Zusammenhang von unterschiedlich intensiver Bewässerung und der daraus resultierenden Grünvolumendichte mit der Verteilung der Gründachtemperatur. Je nach Bewässerungsintensität treten an einem sonnigen Sommertag Temperaturunterschiede von 1,5 °C im Mittel und bis 10 °C im Maximum auf. Im Vergleich zum unbewässerten Bereich reduziert sich die Temperatur auf dem Gründach bis zu 5,2 °C im Mittel und um bis zu 28 °C im Maximum. Die größten Tempertaturunterschiede ergeben sich zwischen Feldern mit mittlerer und geringer Bewässerung. Hohe Wasserzugaben führen nicht zwangsläufig zu einer linearen Absenkung der Gründachtemperatur. Der Gebäudeschatten wirkt sich ebenso reduzierend auf Temperatur und Verdunstung und damit günstig auf das Pflanzenwachstum aus. Dies sollte bei der Planung von Gründächern beachtet werden. Sowohl das Gebäude als auch die sich im Umfeld befindlichen hohen Bäume beeinflussen das Windfeld auf dem Gründach und auch den mit dem Wind verdrifteten Niederschlag. Von einem möglichen „Niederschlagsschatten“ sind v.a. die südlichen Randfelder des Gründachs betroffen. Aufgrund fehlender Vergleichswerte von Wind und Niederschlag auf dem Gründach lässt sich dieser Effekt jedoch nicht nachweisen. Die Daten der neben dem Gründach installierten Klimastation spiegeln die unmittelbaren Mikroklimaverhältnisse am Gründach wider. Die Fernwirkung des Gründachs auf das Mikroklima konnte mit der bestehenden Messkonfiguration nicht belastbar nachgewiesen werden. Hierfür ist eine Erweiterung mit einer räumlich und zeitlich flexiblen Messensorik erforderlich.

#### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Im Arbeitspaket Öffentlichkeitsarbeit wurde zur allgemeinen Information sowohl für Wissenschaft als auch für die Lehre und interessierte Öffentlichkeit eine Webseite eingerichtet (<https://tu-dresden.de/bu/architektur/ila/labau/forschung/laufende-forschungsprojekte/modellprojekt-integrables->

wassermanagement). Auf wissenschaftlicher Ebene wurde das Projekt auf verschiedenen Konferenzen präsentiert u.a. auf novatech-Konferenz 2019 in Lyon, im NEXUS-Seminars der UNU-FLORES Akademie, und auf dem Bundeskongress Gebäudegrün.

Im Rahmen der Umweltbildung wurde das Gründaches mehrfach in sogenannte Gartenrundgänge des Botanischen Gartens sowie der Stadt Dresden eingebunden.

Das Forschungsgründach ist seit Herbst 2020 fester Bestandteil der Lehre in den Studiengängen der Landschaftsarchitektur und Siedlungswasserwirtschaft. Darüber hatten verschiedene studentische (Abschluss-)Arbeiten das Forschungsgründach sowie die Auswertung der ermittelten Messdaten zum Gegenstand.

## **Fazit**

### Arbeitspaket 2 Vitalität und Ästhetik

Die Ergebnisse des hinsichtlich des Witterungsverlaufs sehr extremen Jahres 2022 zeigen deutlich, dass die Vitalität und Ästhetik Einfacher Intensivdachbegrünungen im Vergleich zu den geringer bzw. nicht bewässerten Referenzfeldern verbessert werden kann, je kontinuierlicher das Wasserdargebot im Bereich der maximalen Feldkapazität gehalten wird. In der Auswertung wurde jedoch auch deutlich, dass keine Linearität zwischen Vitalität und Bewässerungsmenge besteht, sondern mit der medialen Bewässerung Bewertungen erzielt werden konnten, welche z.T. nur leicht hinter der maximalen Bewässerung zurücklagen. Selbst in Feldern mit minimalem Bewässerungsregime können im Vergleich zu Flächen mit trockenheitsverträglichen Arten ganzjährig noch ein zufriedenstellendes Erscheinungsbild und eine sommerliche Blütenbildung erreicht werden.

Mit den erhöhten Bewässerungsmengen kann darüber hinaus die artspezifisch die Wuchshöhe, respektive das potentiell verdunstende Vegetationsvolumen gesteigert werden.

Nachteilige Auswirkungen auf das Erscheinungsbild durch die Bewässerung mit vorgefiltertem Grauwasser konnten bis zur Vegetationsperiode 2022 nicht festgestellt werden. Im Frühjahr 2023 kam es jedoch zum Ausfall eines größeren Teils an Standort III gepflanzter Heuchera. Ursache könnte ein festgestellter Befall mit Dickmaulrüsslern sein. Die Untersuchungen laufen derzeit.

### Arbeitspaket 3 Wasserbilanz, Stoffbilanz und Abflussprozesse

Dachbegrünungen können ein wichtiger Baustein eines urbanen Wasserhaushalts sein, der an natürliche Verhältnisse angenähert ist. Dabei steigert Bewässerung die Verdunstungskomponente deutlich und gleicht die geringe Speicherfähigkeit des Dachsubstrats aus. Kontinuierlich anfallendes Grauwasser eignet sich für die Bewässerung und die Bewässerungsmengen können im Hinblick auf eine maximale Verdunstungsleistung optimiert werden. Durch die durchschnittlich höhere Wasserspeicherung des Substrats in Folge der Bewässerung, kann aber bei Regen weniger Wasser zurückgehalten werden und es kommt zu höheren Abflussspitzen und -volumen. Eine Optimierung, die Regenrückhalt und Verdunstungssteigerung berücksichtigt, muss also zwischen diesen beiden Zielen ausgleichen. Die Stoffumsatzprozesse und Aufkonzentrierung bewirken hohe Nitrat und organische Stoffgehalte im Abflusswasser aus Dachbegrünungen, die für eine Wiederverwendung oder Einleitung in Gewässer oder Boden berücksichtigt werden sollten.

### Arbeitspaket 4 Bauklimatische Untersuchung des Kühlpotenzials

Gründächer werden aktuell vornehmlich als extensive Konstruktionen, d.h. in dünn-schichtiger Bauweise mit trockenheitsresistenter Bepflanzung und ohne Bewässerung realisiert. Die bauklimatischen Untersuchungen zeigen, dass eine erhebliche Kühlwirkung von Gründachkonstruktionen nur dann vorhanden ist, wenn eine geeignete Bewässerung umgesetzt wird. Der Hauptanteil der Kühlwirkung kann auf die deutlich erhöhte Wärmespeicherfähigkeit zurückgeführt werden, welche im vorliegenden Projekt mit der medialen Bewässerung schon fast die maximale Wirkung zeigt. Die Maximalbewässerung bringt im Vergleich dazu nur noch einen marginalen Effekt. Der Kühleffekt aus der Verdunstung von den Blattoberflächen (Evapotranspiration) steht einem strahlungseintrags- und abstrahlungsvermindernden

Effekt des Blätterdachs gegenüber und ist betragsmäßig weit unter dem Effekt der Speicherfähigkeit angeordnet. Dennoch ist das vitale Blätterdach auch für die Erhaltung des gespeicherten Wassers im Substrat zuträglich, weil es die direkte Verdunstung aus dem Substrat reduziert.

#### Arbeitspaket 5

Die Ergebnisse der Mikroklimamessungen leisten einen wichtigen Beitrag zum Erkenntnisgewinn hinsichtlich der Wirkung einer kontrollierten Bewässerung auf die thermischen Verhältnisse auf einem Gründach. Die Installation einer ortsfesten Dauererfassung der räumlich verteilten Oberflächentemperatur des Gründachs hat sich als entscheidende Datenquelle für den Erkenntnisgewinn ergeben. Auf Basis der Temperaturmessungen auf dem Gründach der verschiedenen Projektpartner ist es möglich, eine Abschätzung des Kühlpotentials des Gründachs zu liefern. Für die Bestimmung der Randwirkung des Kühleffektes werden kleinräumig verdichtete Messungen von Temperatur und Feuchte mit einem Netz aus Mikrologgern benötigt. Weitere mobile Strahlungsmessungen sollten dazu dienen, den Schatteneffekt des Gebäudes mit seinen positiven Auswirkungen auf Temperatur und Verdunstung zu quantifizieren, um damit eine Datenbasis für Verdunstungsmodelle zu schaffen.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

# Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Impressum.....   | 2  |
| Projektkennblatt.....  | 3  |
| Inhaltsverzeichnis .....   | 9  |
| Abbildungsverzeichnis .....  | 11 |
| Tabellenverzeichnis.....   | 17 |
| Glossar.....   | 18 |
| Zusammenfassung.....   | 19 |
| 1. Anlass und Zielsetzung des Projektes.....                           | 19 |
| 2. Ausgangssituation Forschungsdach.....                               | 22 |
| 2.1. Lage und Einrichtung des Versuchsdaches .....                     | 22 |
| 2.1.1. Exkurs Feldgröße Forschungsfelder .....                         | 29 |
| 2.2. Pflanzenauswahl.....  | 30 |
| 2.2.1. Standortbedingungen .....                                       | 30 |
| 2.2.2. Auswahlverfahren Pflanzen .....                                 | 32 |
| 2.2.3. Pflanzprinzip.....  | 33 |
| 2.3. Messeinrichtung .....   | 36 |
| 2.3.1. Wasserversorgung.....   | 38 |
| 2.3.2. Bodenfeuchte und Bewässerung .....                              | 38 |
| 2.3.3. Auslauf.....  | 40 |
| 2.3.4. Temperatur und Wärmefluss.....                                  | 40 |
| 2.3.5. Verdunstung/Lysimeter .....                                     | 41 |
| 2.3.6. Wetterstation und Infrarotsensor .....                          | 42 |
| 2.3.7. Bewässerungssystem.....   | 42 |
| 3. Öffentlichkeitsarbeit (Arbeitspaket 1).....                         | 43 |
| 3.1. Koordination/Austausch.....                                       | 43 |
| 3.2. Öffentlichkeitsarbeit .....                                       | 43 |
| 3.2.1. Wissenschaftliche Ebene .....                                   | 43 |
| 3.2.2. Umweltbildung und Lehre.....                                    | 46 |
| 4. Vitalität und Ästhetik (Arbeitspaket 2) .....                       | 49 |
| 4.1. Methodik.....   | 50 |
| 4.2. Untersuchungszeitraum.....  | 50 |
| 4.3. Versuchsergebnisse .....  | 53 |
| 4.3.1. Einfluss des Wasserdargebots auf Vitalität und Ästhetik .....   | 53 |
| 4.3.2. Pflegebedarf vitaler Dachflächen .....                          | 77 |
| 4.3.3. Weitere Auswertungen .....                                      | 81 |
| 5. Wasserbilanz, Stoffbilanz und Abflussprozesse (Arbeitspaket 3)..... | 86 |
| 5.1. Wasserhaushalt .....  | 86 |
| 5.1.1. Wasserversorgung.....   | 86 |
| 5.1.2. Bewässerung .....   | 87 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 5.1.3. | Wasserspeicherung im Dachsubstrat.....                                   | 91  |
| 5.1.4. | Abfluss .....  | 96  |
| 5.1.5. | Wasserbilanz und Verdunstung.....  | 99  |
| 5.1.6. | Langzeitsimulation des Wasserhaushalts .....                             | 102 |
| 5.1.7. | Dimensionierung von Wasserspeichern .....                                | 104 |
| 5.2.   | Stoffbilanzen .....  | 109 |
| 5.2.1. | Grauwasser .....   | 109 |
| 5.2.2. | Bewässerungswasser .....   | 110 |
| 5.2.3. | Dachablaufwasser .....   | 111 |
| 6.     | Bauklimatische Untersuchung des Kühlpotenzials (Arbeitspaket 4).....     | 112 |
| 6.1.   | Überblick Datenauswertung 2021 bis 2022 .....                            | 112 |
| 6.2.   | Auswertung der Temperaturprofildaten .....                               | 117 |
| 6.3.   | Abschätzung der ET-Kennwerte aus den Temperaturmessungen .....           | 122 |
| 6.4.   | Wärmestrommessungen.....   | 125 |
| 7.     | Stadtklimatische Bewertung des Kühlpotenzials (Arbeitspaket 5).....      | 132 |
| 7.1.   | Datengrundlage und Methodik der Datenauswertung .....                    | 132 |
| 7.2.   | Analyse der stationären Klimamessung .....                               | 135 |
| 7.2.1. | Witterungsverlauf in der aktiven Messphase des Projektes .....           | 135 |
| 7.2.2. | Vergleich der Messdaten der Klimastation mit der Referenzstationen ..... | 138 |
| 7.2.3. | Bewässerung, Pflanzenbewuchs und Oberflächentemperatur.....              | 142 |
| 7.3.   | Mobile Klimamessungen und Modellsimulationen .....                       | 149 |
| 8.     | Querschnittsorientierte Diskussion der Ergebnisse und Fazit.....         | 151 |
| 8.1.   | Diskussion .....   | 151 |
| 8.2.   | Fazit .....  | 154 |
| 9.     | Literatur.....   | 162 |
| 10.    | Anhang.....  | 167 |
| 10.1.  | Aufbau Bonitur-Umfrage.....  | 167 |
| 10.2.  | Pflanzensteckbriefe .....  | 171 |
| 10.3.  | Wartungsplan des Gründachs .....   | 177 |
| 10.4.  | Vergrößerte Darstellung Abbildung 2.3-1 Messschema.....                  | 178 |

# Abbildungsverzeichnis

*Alle Abbildungen sind, sofern nicht anders angegeben, eigene Darstellungen der Verfasser:innen.*

|   |    |
|---|----|
| <b>Abbildung 2.1-1:</b> Vogelschau auf das Sockelgeschoss von Nord-Osten mit angrenzendem Eingangsbereich.....  | 22 |
| <b>Abbildung 2.1-2:</b> Einbausituation mit Aluminiumwannen integriert in die Grundbegrünung. ....  | 23 |
| <b>Abbildung 2.1-3:</b> Konstruktives Detail für ein Forschungsfeld auf dem Versuchsdach.....   | 23 |
| <b>Abbildung 2.1-4:</b> Schemaplan Anordnung Standorte auf dem Versuchsdach. ....   | 24 |
| <b>Abbildung 2.1-5:</b> Drohnenaufnahme des Extensiv-Feldes Fl.4 am 10.08.2021. ....  | 26 |
| <b>Abbildung 2.1-6:</b> Übersichtsplan Gründach mit Beschriftung der Felder und Bewässerungsregime. ....  | 27 |
| <b>Abbildung 2.1-7:</b> Pflanzenkläranlage zur Vorreinigung des aus dem Verwaltungsgebäude ausgeleiteten Grau-wassers. ....   | 28 |
| <b>Abbildung 2.1-8:</b> Eingebaute Tröpfchenbewässerung in Forschungsfeld FII.2 an Standort II. ....  | 29 |
| <b>Abbildung 2.2-1:</b> Schattendiagramm aus 3D-Modell mit Sonnenverlauf für Dresden am 30. März um 9:00, 12:00 und 16:00. ....   | 31 |
| <b>Abbildung 2.2-2:</b> Schattendiagramm aus 3D-Modell mit Sonnenverlauf für Dresden am 30. Juli um 9:00, 12:00 und 16:00. ....   | 31 |
| <b>Abbildung 2.2-3:</b> Beispielhafter Pflanzplan Forschungsfeld Fl.5 (Standort I – tendenziell sonnig), mit Positionsnummern für Initial- und Nachpflanzung.....                                       | 34 |
| <b>Abbildung 2.3-1:</b> Schema des Messsystems im Botanischen Garten. TIR surface temperature; Q flow; WQ water; quality; C climate; L lysimeter; SH substrate humidity; ST substrate temperature. .... | 37 |
| <b>Abbildung 2.3-2:</b> Durchflussmesser am Dachzulauf. ....  | 38 |
| <b>Abbildung 2.3-3:</b> Sammelbehälter mit Messung von geschlitztem Auslass. ....   | 40 |
| <b>Abbildung 2.3-4:</b> Vergleich der Gewichtsmessung des Lysimeter Fl.1 vor dem Umbau (2021) und danach (2022). ....   | 41 |
| <b>Abbildung 3.2-1:</b> Artikel der Sächsischen Zeitung über das Forschungsprojekt „Modellprojekt Integrales Wasser-management“. ....   | 45 |
| <b>Abbildung 3.2-2:</b> Dresdner Gartenspaziergang am 28.06.23. ....  | 46 |
| <b>Abbildung 4.2-1:</b> Vergleich Feld Fl.1 2021 und 2022. ....   | 52 |
| <b>Abbildung 4.3-1:</b> Mittelwert Erscheinungsbild aller Felder nach Bewässerungsregime. ....  | 54 |
| <b>Abbildung 4.3-2:</b> Erscheinungsbild der Felder Fl.1, Fl.2 und Fl.3. ....   | 54 |
| <b>Abbildung 4.3-3:</b> Erscheinungsbild der Felder FII.1, FII.2 und FII.3. ....  | 54 |
| <b>Abbildung 4.3-4:</b> Erscheinungsbild der Felder FIII.1, FIII.2 und FIII.3. ....   | 54 |
| <b>Abbildung 4.3-5:</b> Bildvergleich Feld Fl.3 in Bonitur 22-05 und 22-07.....   | 55 |
| <b>Abbildung 4.3-6:</b> Lufttemperatur und Bodenfeuchte im Feld Fl.3 im Zeitraum 01.04. – 30.09.22. ....  | 56 |
| <b>Abbildung 4.3-7:</b> Vergleich der mittleren Deckungsgrade aller Forschungsfelder nach Bewässerungsregimen, erhoben nach optischer Einschätzung durch Boniteur:in. ....                              | 56 |
| <b>Abbildung 4.3-8:</b> Lufttemperaturen im Zeitraum 01.04.-30.11.22 mit Markierung der Sommertage (gelbe Linie), Hitzetage (rote Linie) und den Bonituren (blau Linien). ....                          | 57 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Abbildung 4.3-9:</b> Bildvergleich der Drohnenaufnahmen der Forschungsfelder FI.1 (unten, Maximalbewässerung), FI.2 (Mitte, Medialbewässerung) und FI.3 (oben, Minimalbewässerung) der Bonituren 2022 mit auffälligen Unterschieden im Deckungsgrad.....    | 59 |
| <b>Abbildung 4.3-10:</b> Bildvergleich der Forschungsfelder FI.1 (Oben, Maximalbewässerung), FI.2 (Mitte, Medialbewässerung) und FI.3 (Unten, Minimalbewässerung) in Bonitur 22-11 am 19.August 2022 mit ermitteltem Deckungsgrad und Bewässerungszyklus. .... | 60 |
| <b>Abbildung 4.3-11:</b> Vergleich der mittleren Deckungsgrade 2022 aller Forschungsfelder nach Bewässerungsregimen, erhoben durch graphische Auswertung. ....   | 61 |
| <b>Abbildung 4.3-12:</b> Vergleich der mittleren Deckungsgrade 2022 der Forschungsfelder aus Standort I und II nach Bewässerungsregimen, erhoben durch graphische Auswertung. ....   | 62 |
| <b>Abbildung 4.3-13:</b> Vergleich der mittleren Deckungsgrade 2022 der Forschungsfelder aus Standort III nach Bewässerungsregimen, erhoben durch graphische Auswertung. ....  | 62 |
| <b>Abbildung 4.3-14:</b> Vergleich der mittleren Deckungsgrade 2021 aller Forschungsfelder nach Bewässerungsregimen, erhoben durch graphische Auswertung. ....   | 63 |
| <b>Abbildung 4.3-15:</b> Vergleich der Methoden zur Ermittlung des Deckungsgrades.....   | 63 |
| <b>Abbildung 4.3-16:</b> Vergleich der Maximalhöhe von Bistorta in den Feldern FII.5, FII.6 und FII.7. ...   | 65 |
| <b>Abbildung 4.3-17:</b> Vergleich der Maximalhöhe von Bistorta in den Feldern FI.1, FI.2 und FI.3. ...  | 65 |
| <b>Abbildung 4.3-18:</b> Vergleich der Maximalhöhe von Bistorta in allen Feldern der Standort I+II. ....   | 65 |
| <b>Abbildung 4.3-19:</b> Vergleich der Maximalhöhe aller Arten in allen Feldern nach Bewässerungsregimen.....  | 66 |
| <b>Abbildung 4.3-20:</b> Vergleich des Blühverhaltens von Brunnera in den Feldern von Standort I und II.....   | 67 |
| <b>Abbildung 4.3-21:</b> Vergleich des Blühverhaltens von Bistorta in den Feldern von Standort I und II. ....  | 68 |
| <b>Abbildung 4.3-22:</b> Bildvergleich der Forschungsfelder FIII.1-3 in Bonitur 22-16 (28. Oktober 2022) und 22-17 (11. November 2022). ....   | 68 |
| <b>Abbildung 4.3-23:</b> Vergleich des Blühverhaltens von Heuchera in den Feldern von Standort III. .  | 69 |
| <b>Abbildung 4.3-24:</b> Vergleich des Blühverhaltens von Bergenia in den Feldern von Gruppe III. ....   | 70 |
| <b>Abbildung 4.3-25:</b> Vergleich der Blattanzahl aller Arten in allen Feldern nach Bewässerungsregime. ....  | 70 |
| <b>Abbildung 4.3-26:</b> Vergleich der Blattgröße aller Arten in allen Forschungsfeldern nach Bewässerungsregime. ....   | 71 |
| <b>Abbildung 4.3-27:</b> Vergleich der Blattgesundheit aller Arten in allen Forschungsfeldern nach Bewässerungsregime. ....  | 73 |
| <b>Abbildung 4.3-28:</b> Vergleich der Blattgesundheit von Geranium in allen Forschungsfeldern.....  | 73 |
| <b>Abbildung 4.3-29:</b> Vergleich der Blattgesundheit von Lysemachia in allen Forschungsfeldern.....  | 73 |
| <b>Abbildung 4.3-30:</b> Mittlere Pflanzenvolumina ermittelt aus Bistorta und Geranium in 2022 in den Standort I und II. ....  | 75 |
| <b>Abbildung 4.3-31:</b> Mittlere Pflanzenvolumina ermittelt aus Bistorta und Geranium in 2022 der Felder FI.1, FI.2 und FI.3. ....  | 75 |
| <b>Abbildung 4.3-32:</b> Zur Bestimmung entnommene Individuen 2,5 Monat nach Entnahme, von links oben nach rechts unten Salvia rosmarinus, Acer palmatum, Acer platanoides, Heuchera villosa, Clematis vitalba. ....   | 79 |
| <b>Abbildung 4.3-33:</b> Vergleich des Arteneinflugs 2022 in allen Feldern nach Bewässerungsregime. ....   | 80 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Abbildung 4.3-34:</b> Bildvergleich der Drohnenaufnahmen des Forschungsfeldes Fl.4 (Mitte, unbewässert, Extensivbegrünung). Ab Bonitur 22-12 wurden lediglich geringe Unterschiede festgestellt, daher sind diese hier nicht dargestellt. ....   | 82  |
| <b>Abbildung 4.3-35:</b> Bildvergleich ausgewählter Aufnahmen der unbewässerten Nebenflächen in 2022. ....  | 84  |
| <b>Abbildung 4.3-36:</b> Vergleich der Entwicklung der Nebenflächen von Sommer 2022 bis Sommer 2023. ....   | 85  |
| <b>Abbildung 5.1-1:</b> Verlauf der anfallenden Grauwassermengen im Projektzeitraum (links) und der ausgeleiteten Grauwassermengen aus dem Gebäude (Q(Gebäude) und Zulauf zur Pflanzenkläranlage (Q(PKA) nach Installation des Bewässerungssystems (rechts). ....   | 86  |
| <b>Abbildung 5.1-2:</b> Wasserbilanz der Pflanzenkläranlage im Zeitraum April 2021 – Dezember 2022 mit den Bilanz-komponenten Zufluss (CW.in), Abfluss (CW.out), Niederschlag (P) und Verdunstung (ETR). ....   | 87  |
| <b>Abbildung 5.1-3:</b> Fotografische und schematische Darstellung des Laborlysimeterversuchs. ....   | 88  |
| <b>Abbildung 5.1-4:</b> Niederschlag und Abläufe aus den Kippzählermessungen (Forschungsfelder Fl.1 – maximal, Fl.2 – medial, Fl.3 – minimal) von 01. – 10.08.22. ....  | 89  |
| <b>Abbildung 5.1-5:</b> Niederschlag und Abläufe aus den Kippzählermessungen (Forschungsfelder Fl.1 – maximal, Fl.2 – medial, Fl.3 – minimal) für mehrere aufeinander folgende Regenereignisse im Zeitraum 20. – 22.08.2022. ....   | 90  |
| <b>Abbildung 5.1-6:</b> Im Labor ermittelte Kalibrierfunktionen für den HydraProbe-Sensor (R – Versuchsreihe, V – Versuchsdurchlauf). ....  | 93  |
| <b>Abbildung 5.1-7:</b> Volumetrische Bodenfeuchte des Forschungsfelds Fl.1 im Winterhalbjahr 2021/22 vor (dunkelblau) und nach der Korrektur (hellblau) mit den Gewichtsdaten. ....  | 95  |
| <b>Abbildung 5.1-8:</b> Über die Gewichtsdaten korrigierte volumetrische Bodenfeuchte der Forschungsfelder Fl.1 bis Fl.3 im Winterhalbjahr 2021/22. ....  | 95  |
| <b>Abbildung 5.1-9:</b> Darstellung der Volumenbilanz des Ablaufbehälters. ....   | 96  |
| <b>Abbildung 5.1-10:</b> Gegenüberstellung von Abfluss aus den Kippzählermessungen und aus dem Wasserstand der CTD-Sonde ermittelt für 19 Regenereignisse im Zeitraum 2021/22 des Forschungsfeldes Fl.2. ....   | 98  |
| <b>Abbildung 5.1-11:</b> Wasserbilanz des Forschungsfeldes Fl.1 für den Monat August 2022. ....   | 100 |
| <b>Abbildung 5.1-12:</b> Tägliche reale Verdunstung der Forschungsfelder Fl.1 bis Fl.3 für den Monat August 2022 (Querlinien entsprechen den Mittelwerten). ....  | 101 |
| <b>Abbildung 5.1-13:</b> Bilanzierte Verdunstung und Substratfeuchte im Zeitraum 2007 – 2022 für bewässerte und unbewässerte Dachbegrünungen. Oben tägliche Verdunstungsraten, 2. von oben Zeitreihe der Substratfeuchte, 3. von oben Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Substratfeuchten, unten Anzahl und Dauer der Trockenperioden. ....   | 103 |
| <b>Abbildung 5.1-14:</b> Verlauf der Speicherfüllung bei Nutzung von Grau- und Regenwasser im Zeitraum 2007 – 2022 für die Ausgangskonfiguration des Wasserertrags und bei maximaler Bewässerungsintensität. ....   | 105 |
| <b>Abbildung 5.1-15:</b> Anteil an Tagen mit leerem Wasserspeicher während der Bewässerungsphase. Oben bei Versorgung mit Regenwasser (RW), in Abhängigkeit von der angeschlossenen Fläche (A_imp) je bewässerter Fläche (A_irr), 2. von oben bei Versorgung mit Grauwasser (GW), in Abhängigkeit von der Anzahl angeschlossener Pers-onen (E_GW) je bewässerter Fläche, 3. von oben in Abhängigkeit vom Speichervolumen (V) je bewässerter Fläche, unten bei Versorgung mit Regenwasser Anteil der Tage ab denen Bewässerungswasser bereitgestellt werden kann. .... | 108 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Abbildung 5.2-1:</b> Trübung und Konzentration von organischen Summenparametern (links) und Stickstoffparameter (rechts) während einer Messkampagne im Zeitraum Mai-Juli 2021 in unbehandeltem Grauwasser. ....   | 109 |
| <b>Abbildung 5.2-2:</b> Trübung und Konzentration von organischen Summenparametern chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) (links) und Stickstoffparameter Gesamtstickstoff (TNroh), filtrierter Gesamtstickstoff (TNmf), Nitrat-Stickstoff (NO <sub>3</sub> -N) (rechts) während einer Messkampagne im Zeitraum Mai-Juli 2021 in behandeltem Grauwasser. .... | 110 |
| <b>Abbildung 5.2-3:</b> Trübung und Konzentration von organischen Summenparametern (links) und Stickstoffparameter (rechts) während einer Messkampagne im Zeitraum Mai-Juli 2021 im Dach-Ablaufwasser. ....  | 111 |
| <b>Abbildung 6.1-1:</b> Übersicht Temperaturmessungen für alle Testfelder und für die beiden Jahre 2021 und 2022 aus den Hydraprobes, welche etwa in Feldmitte und etwa in der Mitte der Substrathöhe eingebracht wurden. ....   | 112 |
| <b>Abbildung 6.1-2:</b> Übersicht volumetrischen Feuchtemessungen für alle Testfelder und für die beiden Jahre 2021 und 2022 aus den Hydraprobes, welche etwa in Feldmitte und etwa in der Mitte der Substrathöhe eingebracht wurden. ....   | 114 |
| <b>Abbildung 6.1-3:</b> Übersicht der redundanten Messungen für die Feuchtegehaltsänderung: Wägung (oberer Linien) und volumetrische Feuchtemessung (untere Linien). ....  | 115 |
| <b>Abbildung 6.1-4:</b> Gegenüberstellung der Feuchtemessungen aus Wägung und volumetrischem Feuchtegehalt unkorrigiert für die Felder Fl.1 (blau), Fl.2 (gelb) und Fl.3 (grün), links ist ein Ausschnitt der Zeitreihen für Sommer 2021 dargestellt, rechts ist das Streudiagramm für den gesamten Datensatz 2021-2022 abgebildet. ....   | 116 |
| <b>Abbildung 6.2-1:</b> Übersicht der Temperaturmessungen aus den Lanzensensoren, welche im Endbereich der länglichen Testfelder aus Messgruppe I installiert wurden, für das Jahr 2022. Verglichen sind die Oberflächen-temperaturen des am stärksten bewässerten Feldes und des unbewässerten Feldes. ....   | 118 |
| <b>Abbildung 6.2-2:</b> Übersicht der Temperaturmessungen aus den Lanzensensoren, welche im Endbereich der länglichen Testfelder aus Messgruppe I installiert wurden, für das Jahr 2022. Verglichen sind die Substratbodentemperaturen des am stärksten bewässerten Feldes und des unbewässerten Feldes. ....  | 119 |
| <b>Abbildung 6.2-3:</b> Übersicht der Temperaturmessungen aus den Lanzensensoren für das Jahr 2022. Verglichen sind die Substratboden- (rechts) und die Dachoberflächentemperaturen (links) des maximal bewässerten Feldes (Diagramme links) und des unbewässerten Feldes (Diagramme rechts). ....   | 120 |
| <b>Abbildung 6.2-4:</b> Feuchtegehaltsmessungen der Hydraprobes für die volumetrische Feuchte in Feldmitte im Substrat für den Monat August 2022 im Vergleich des maximal bewässerten Feldes (links) und des unbewässerten Feldes (rechts). ....   | 121 |
| <b>Abbildung 6.3-1:</b> Übersicht der Temperaturmessungen aus den Lanzensensoren für August 2022. Verglichen sind die Temperaturen am Boden der vier unterschiedlich bewässerten Testfelder aus Gruppe I. ....   | 122 |
| <b>Abbildung 6.3-2:</b> Übersicht der Temperaturmessungen aus den Lanzensensoren für August 2022. Verglichen sind die Temperaturen an der Oberfläche der vier unterschiedlich bewässerten Testfelder aus Gruppe I. ....  | 123 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Abbildung 6.3-3:</b> Ergebnis der Strahlungseintragssimulation für den Monat August 2022. Dargestellt ist der Anteil der Diffus- und Direktstrahlung (Globalstrahlung) im Verhältnis zur horizontal auftreffenden Globalstrahlung der Wetterstation. ....   | 124 |
| <b>Abbildung 6.4-1:</b> Ergebnis der volumetrischen Feuchtegehaltmessungen der Hydraprobes in den Feldern Fl.4, Fl.5 und Fl.6 für August 2022. Es ist zu beachten, dass die Reihenfolge entsprechend der Bewässerungsintensität aufgeführt ist, d.h. Feld I-5 und Feld I-6 sind gegenüber der geometrischen Anordnung vertauscht. .... | 125 |
| <b>Abbildung 6.4-2:</b> Ergebnis der Wärmestrommessungen für die Felder Fl.4, Fl.6 und Fl.5 am Boden der Substrat-schicht des Gründachs für das gesamte Jahr 2022. Zur besseren Interpretierbarkeit sind die Tagesmittelwerte und nicht die Stundenwerte abgebildet. ....  | 126 |
| <b>Abbildung 6.4-3:</b> Ergebnis der Wärmestrommessungen für die Felder Fl.4, Fl.5 und Fl.6 in der Substratebene des Gründachs für August 2022. ....   | 127 |
| <b>Abbildung 6.4-4:</b> Ergebnis der Wärmestrommessungen für die Felder Fl.4, Fl.5 und Fl.6 in der Substratebene des Gründachs für Februar 2022. ....  | 128 |
| <b>Abbildung 7.1-1:</b> Lage des Gründachs (1) am Verwaltungsgebäude des Botanischen Gartens sowie der Klimastation (2, Projekt MIW, TUD) und der Referenzstationen (3, LHD, DWD). ....  | 132 |
| <b>Abbildung 7.1-2:</b> Klimastation im Projekt MIW. ....  | 133 |
| <b>Abbildung 7.1-3:</b> Position und Ausrichtung des Infrarotsensors am Verwaltungsgebäude des Botanischen Gartens. Das Messfeld entspricht etwa dem Fotoausschnitt in Abbildung 7-4 (Foto: V. Goldberg, 11.08.2021 und 07.09.2022). ....  | 133 |
| <b>Abbildung 7.1-4:</b> Östlicher Teil des Gründachs mit den Feldern mit differenzierter Grauwasserbewässerung. Die Felder Fl. 1-I bis 1-VI stehen im Fokus der Auswertung der Daten des Infrarotsensors. (Foto: V. Goldberg, 25.08.2022). ....  | 134 |
| <b>Abbildung 7.1-5:</b> Automatische Klimastationen der Landeshauptstadt Dresden (rechts) und des Deutschen Wetterdienstes (links), 50 m südöstlich des Gründachs im Botanischen Garten (Foto: V. Goldberg, 25.08.2022). ....  | 134 |
| <b>Abbildung 7.2-1:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Globalstrahlung an der Klimastation, Mai 2020- November 2022. ....  | 135 |
| <b>Abbildung 7.2-2:</b> Häufigkeitsverteilung von Temperatur und Dampfdruck an der Klimastation Gründach von Mai-Oktober der Jahre 2021 und 2022. ....   | 136 |
| <b>Abbildung 7.2-3:</b> Häufigkeitsverteilung der Globalstrahlung (10min-Mittelwerte) und der relativen Sonnenscheindauer an der Klimastation Gründach von Mai-Oktober der Jahre 2021 und 2022. ....   | 137 |
| <b>Abbildung 7.2-4:</b> Häufigkeiten der Windrichtung und windrichtungsabhängigen Windgeschwindigkeit an der Klimastation Gründach Botanischer Garten, 12.05.2020 - 10.11.2022. ....   | 137 |
| <b>Abbildung 7.2-5:</b> Temperaturvergleich der Klimastation am Gründach mit der Referenzstation LHD (links) bzw. DWD (rechts). ....   | 138 |
| <b>Abbildung 7.2-6:</b> Temperaturvergleich der Klimastation am Gründach mit der DWD-Referenzstation für den 18.06.2022. ....  | 138 |
| <b>Abbildung 7.2-7:</b> Dampfdruckvergleich der Klimastation am Gründach mit der DWD-Referenzstation für den Zeitraum Mai-Juli 2022 (links) und den 18.06.2022 (rechts). ....  | 139 |
| <b>Abbildung 7.2-8:</b> Vergleich der gemessenen Globalstrahlung der Klimastation am Gründach mit der DWD-Referenzstation für den Zeitraum Mai-Juli 2022 (links) und den 18.06.2022 (rechts)...  | 140 |
| <b>Abbildung 7.2-9:</b> Vergleich der Windgeschwindigkeit an der Klimastation am Gründach mit der DWD-Referenzstation für den Zeitraum Mai-Juli 2022 (links). ....   | 140 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Abbildung 7.2-10:</b> Windrichtungs- und Geschwindigkeitsverteilung an der Klimastation am Gründach und der DWD-Referenzstation für den Zeitraum Januar-Juli 2022.....  | 141 |
| <b>Abbildung 7.2-11:</b> Strahlungstemperatur des Gründachs im Sichtfenster des Infrarotsensors, 08.08.2022, 11:37 MEZ. ....   | 142 |
| <b>Abbildung 7.2-12:</b> Zusammenhang von Solarstrahlung und Oberflächentemperatur im Juni 2022, 11:00 MEZ, Fl.3. ....   | 143 |
| <b>Abbildung 7.2-13:</b> Vergleich der Oberflächentemperatur für zwei wolkenlose Tage im August. Links: 14.08.2021, 11:35 MEZ, rechts: 08.08.2022, 11:37 MEZ.....  | 144 |
| <b>Abbildung 7.2-14:</b> Strahlungstemperatur des Gründachs im Aufnahmebereich des Infrarotsensors bei Durchgang des Gebäudeschattens am 08.08.2022, 13:37 MEZ. ....   | 144 |
| <b>Abbildung 7.2-15:</b> Tagesgang der Globalstrahlung und der lokalen maximalen Strahlungstemperatur am 08.08.2022 in den Flächen Fl.1 bis Fl.6. Der Einfluss des Gebäudeschattens ist bis Fl.4 erkennbar. ....   | 145 |
| <b>Abbildung 7.2-16:</b> Einfluss des Schattendurchganges (Boxplot links) des Verwaltungsgebäudes auf die Oberflächentemperatur im Vergleich zu voller Besonnung (Boxplot rechts) im mittleren Bereich des Gründachs.....  | 146 |
| <b>Abbildung 7.2-17:</b> Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperatur am 18.06.2022, 10:00-12:50 MEZ in den Feldern Fl.1 bis Fl.3. ....   | 147 |
| <b>Abbildung 7.2-18:</b> Verteilung der Flächenmitteltemperatur in den Feldern Fl.1 bis Fl.6 im August 2022, ca. 11:00 MEZ. ....   | 147 |
| <b>Abbildung 7.2-19:</b> Änderung der mittleren Oberflächentemperatur in den Lysimeterfeldern Fl.2 und Fl.3 im Vergleich zum Feld Fl.1 in Abhängigkeit von Pflanzenbedeckungsgrad (pc) bzw. Grünvolumen (GV). Basis: Messdaten TIR 11:00 MEZ, pc und GV von Anfang August, Mitte Juni und Ende September 2022..... | 148 |
| <b>Abbildung 7.3-1:</b> Trendkorrigierte Lufttemperatur während einer Messrunde im Botanischen Garten am 30.03.21, 13:46-14:15 MESZ (Daten aus Projektarbeit P. Volks (s. 3.2.2)): × Lage des Gründachs. ....  | 149 |
| <b>Abbildung 7.3-2:</b> Oberflächentemperatur während einer Messrunde im Botanischen Garten am 30.03.21, 13:46-14:15 MESZ (Daten aus Projektarbeit P. Volks (s. 3.2.2)): × Lage des Gründachs.   | 150 |
| <b>Abbildung 7.3-3:</b> Verwaltungsgebäude im Botanischen Garten mit Gründach und umgebender Vegetation: Inputfile des Mikroklimamodells Envi-met5. ....   | 150 |
| <b>Abbildung 7.3-4:</b> Tagesgang der direkten solaren Einstrahlung und der mittleren Strahlungstemperatur (entspricht der Summe aller Strahlungsströme) auf den Feldern Fl-1 bis Fl-4.....  | 150 |

## Tabellenverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tabelle 2-1:</b> Auflastberechnung für die Einfache Intensivdachbegrünung.....  | 24  |
| <b>Tabelle 2-2:</b> Vergleich von Kenndaten für das eingesetzte Substrat mit Herstellerangaben und Laborwerten aus Analysen der Siedlungshydrologie. ....  | 25  |
| <b>Tabelle 2-3:</b> Lichtverhältnisse der Standorte auf dem Forschungsdach mit Bezug zu Standorteigenschaften gem. Literatur.....  | 30  |
| <b>Tabelle 2-4:</b> Artenauswahl der Forschungsfelder nach Standort mit Angabe des Lebensbereiches. ....   | 33  |
| <b>Tabelle 2-5:</b> Übersicht über die Pflanzendichte je Standort auf dem Dach.....  | 34  |
| <b>Tabelle 2-6:</b> Artenliste Initialpflanzung Grundbegrünung Gründach Botanischer Garten. ....   | 35  |
| <b>Tabelle 2-7:</b> Artenliste Nachpflanzung Nebenflächen Frühjahr 2021.....   | 36  |
| <b>Tabelle 2-8:</b> Übersicht zu eingesetzten Sensoren und Messbereichen.....  | 37  |
| <b>Tabelle 2-9:</b> Spezifikationen der unterschiedlichen Bewässerungsregime. ....   | 42  |
| <b>Tabelle 4-1:</b> Untersuchungsparameter der Bonituren und zugehörige Auswertungsebene.....  | 49  |
| <b>Tabelle 4-2:</b> Terminplan der Bonituren für 2021.....   | 51  |
| <b>Tabelle 4-3:</b> Terminplan der Bonituren für 2022.....   | 51  |
| <b>Tabelle 4-4:</b> Skala Erscheinungsbild. ....   | 53  |
| <b>Tabelle 4-5:</b> Skala Blühverhalten. ....  | 67  |
| <b>Tabelle 4-6:</b> Verwendete Arten und Insektenfreundlichkeit. ....  | 69  |
| <b>Tabelle 4-7:</b> Skala Blattanzahl. ....  | 71  |
| <b>Tabelle 4-8:</b> Skala Blattgröße.....  | 71  |
| <b>Tabelle 4-9:</b> Skala Blattgesundheit. ....  | 72  |
| <b>Tabelle 4-10:</b> optischer und volumetrischer Vergleich der Felder FI.1(maximal bewässert), FI.2 (medial bewässert) und FI.3 (minimal bewässert) an drei Terminen 2022. ....                                 | 76  |
| <b>Tabelle 4-11:</b> Wild aufgewachsene Arten sortiert nach Jahr.....  | 78  |
| <b>Tabelle 5-1:</b> Bewässerungspläne für das Sommerhalbjahr 2021 und 2022.....  | 89  |
| <b>Tabelle 5-2:</b> Übersicht der Bodenparameter des Gründachsubstrats. ....   | 92  |
| <b>Tabelle 5-3:</b> Trockengewicht des Substrats und volumetrische Bodenfeuchteänderung je 1 kg Masseänderung (Wasserzufuhr) für die Lysimeterfelder. ....   | 94  |
| <b>Tabelle 5-4:</b> mittlere Zulauf- und Ablaufkonzentrationen der Pflanzenkläranlage und mittleren Reinigungsleistung bezogen auf die Konzentration im Zeitraum Mai-Juli 2021. ....                             | 110 |
| <b>Tabelle 6-1:</b> Berechnungskennwerte für die Abschätzung der durchschnittlichen ET-Differenzen in den bewässerten Feldern FI.1 bis FI.3 gegenüber dem unbewässerten Feld FI.4 für den Monat August 2022..... | 123 |
| <b>Tabelle 7-1:</b> Klimawerte der Periode April-Oktober 2021 und 2022 in Dresden-Klotzsche. ....  | 135 |
| <b>Tabelle 7-2:</b> Messung der Oberflächenalbedo auf dem Gründach am 18.05.2021, vormittags..   | 148 |
| <b>Tabelle 7-3:</b> Messung der Oberflächenemissivität auf dem Gründach im Frühjahr 2021, vormittags.....  | 148 |

## Glossar

CIDR (Coaxial Impedance Dielectric Reflectometry): Amplituden-basiertes Messverfahren zur reflektrometrischen Erfassung von Bodeneigenschaften

CFD (Computational Fluid Dynamics)

Einwohnerwerte: Abwassertechnische Kenngröße zur Beschreibung von Abwasservolumen und -frachten die den täglich anfallenden Mengen einer Person entsprechen

CSB (chemischer Sauerstoffbedarf): Kenngröße der Wasserqualität, Summenparameter für organische Wasserinhaltsstoffe

DOC (gelöster organischer Kohlenstoff, Dissolved Organic Carbon): Kenngröße der Wasserqualität, Summenparameter für gelöste organische Wasserinhaltsstoffe

FDR (Frequency-Domain-Reflectometry): Frequenz-basiertes Messverfahren zur reflektrometrischen Erfassung von Bodeneigenschaften

FKD: Festkörperdränage

NO<sub>3</sub>-N (Nitrat-Stickstoff): Kenngröße der Wasserqualität

TDR (Time-Domain-Reflectometry): Laufzeit-basiertes Messverfahren zur reflektrometrischen Erfassung von Bodeneigenschaften

Trübung: Kenngröße der Wasserqualität, Näherungsparameter für partikuläre Wasserinhaltsstoffe

TN (Gesamtstickstoff, Total Nitrogen): Kenngröße der Wasserqualität, Summenparameter für Stickstoff

TOC (Gesamtkohlenstoff, Total Organic Carbon): Kenngröße der Wasserqualität, Summenparameter für organische Wasserinhaltsstoffe

UAV (Unmanned Aerial Vehicle): Drohne

Ubiquist: eine an sehr unterschiedlichen Standorten auftretende Pflanzenart

Xeromorphe Pflanzenart: trockenheitsangepasste Pflanzenart

# Zusammenfassung

## 1. Anlass und Zielsetzung des Projektes

Die zunehmende Urbanisierung führt zu Veränderungen des lokalen und globalen Wasserhaushalts (DWD 2014A; BMU 2003) mit negativen Auswirkungen auf Mensch und Natur. Mit einem gesteigerten Grad der Versiegelung nimmt der Oberflächenabfluss bei Niederschlagsereignissen zu während sich die Verdunstung und die Versickerung im Verhältnis verringern. Neben den gewässerökologischen Folgen wirken sich diese Veränderungen auch nachteilig auf das Stadtklima aus (MKULNV 2011). Eine reduzierte Verdunstung und Wasserverfügbarkeit in den Böden sowie die erhöhte Wärmeabsorption von Gebäuden und Verkehrsflächen verstärken den Effekt städtischer Hitzeinseln zusehends.

Regional und global lassen Klimaprojektionen eine Zunahme von sommerlichen Hitze- und Trockenperioden erwarten mit der Folge kritischer Veränderungen der Vegetationsbedingungen und stadtklimatischer Situationen (DWD 2014B, SEIDEL, A., 2012). Der aus stadtklimatischer Sicht unabdingbaren Erhaltung und Förderung grünger, unversiegelter Flächen stehen jedoch Nachverdichtungstendenzen mit hoher Ausnutzung der Grundstücke entgegen. In diesem Zusammenhang kann Dachbegrünungen zur Kompensation der Flächen- und Funktionsverluste eine bedeutende Rolle zukommen. Effekte wie die Erhöhung der Biodiversität (OBERNDORFER ET AL. 2007), ein erhöhtes Retentionsvermögen bei Starkniederschlägen, Minderung von Luftverschmutzung (CURRIE, BASS 2008) sowie thermische Isolation von Gebäuden (TAM, WANG, LE 2016) sind hier zu nennen.

Für die Gebäudeklimatisierung gibt es umfangreiche Erkenntnisse zum isolierenden und amplitudendämpfenden Effekt von Gründächern. In welchem Umfang eine Bewässerung zu einer aktiven Kühlung des Gebäudes beitragen kann, wurde bislang jedoch nicht untersucht.

In Bezug auf die Regenrückhaltefunktion und die Abflussverzögerung sind Dachbegrünungen bereits heute eine wichtige, anerkannte Komponente naturnaher Regenwasserbewirtschaftungskonzepte. Es liegen Anhaltswerte für die Rückhaltung von Regenwasser zwischen 40% bis 60% bis hin zu über 90% in Abhängigkeit von der Aufbaudicke vor (KOLB 2003, FLL 2018). Grundsätzlich ist festzustellen, dass mit größeren Aufbaudicken auch höhere Werte der Rückhaltung erreicht werden. Demgegenüber wird bei mittleren Aufbauhöhen, aber schlechtem Deckungsgrad der Vegetation nur ein geringer Wasserrückhalt erreicht (SALCHEGGER, H., 2010). Im Umkehrschluss könnte eine positive Beeinflussung des Deckungsgrads der Vegetation bspw. durch Bewässerung, die Rückhaltung fördern. Untersuchungen zeigen, dass insbesondere nach längeren Trockenperioden die Wasseraufnahmefähigkeit des nahezu ausgetrockneten Substrats

zunächst sehr gering ist, durch eine kontinuierliche Grundfeuchte jedoch möglicherweise erhöht werden kann (FEHMER, D., ANLAUF, DR. R., REHRMANN, P., 2011).

Die Komponente Evapotranspiration (kurz ET = Transpiration, Interzeption und Bodenevaporation) des natürlichen Wasserkreislaufes kann einen wesentlichen Anteil der Niederschlagsmenge ausmachen. Innerhalb dieser Größe liegt vor allem der Anteil an Transpiration und Interzeption wesentlich über dem Anteil der Bodenevaporation (ZIMMERMANN, RASPE, SCHULZ, GRIMMEISEN 2008). Nachdem bereits zum Zeitpunkt des Projektantrags zu erwarten war, dass die Evapotranspiration in Zukunft in Regenwasserbewirtschaftungskonzepten stärker berücksichtigt sein wird (UHL, HENRICH; LANGNER 2014), geht die im Dezember 2020 eingeführte Richtlinie DWA-A102 gezielt auf die Wasserbilanz von Planungsgebieten ein. Dabei ist vor allem die Erhaltung bzw. weitestgehend Annäherung der lokalen Verdunstungsrate ein Baustein, bei dem das Potential von begrünten Dachflächen eine wichtige Rolle übernehmen kann. Über die grundsätzlich gegenüber nicht begrünten Dachflächen zu erwartende erhöhte Verdunstungsrate hinaus, zeigen Forschungsergebnisse an Mischpflanzungen unter Gewächshausbedingungen, dass mit einer gezielten Bewässerung die Evapotranspiration gezielt gesteigert werden kann (JAUCH, KRUMMRADT, SCHMITZ, LOHR, MEINKEN 2016). Ausgehend von diesen Untersuchungen sowie dem Umstand, dass Extensivbegrünung bestehend aus trockenheitsangepassten (xeromorphen) Pflanzen die Verdunstungsaktivitäten in den besonders heißen Sommermonaten reduzieren bzw. einstellen, werden keine xeromorphen Pflanzen für die Untersuchungen eingesetzt.

Ziel des Projektes ist es zu untersuchen, ob sich prognostizierte bzw. unter unterschiedlichen Versuchsbedingungen aus vorangegangenen Forschungsprojekten sektoral und bisher überwiegend nur für Extensivbegrünungen (mit xeromorphen Arten) nachgewiesenen Effekte für eine einfache Intensivbegrünung in einer typischen, gebauten Dachbegrünungssituation unter realen klimatischen Bedingungen durch eine Bewässerung mit aufbereitetem Grauwasser verstetigen und steigern lassen. Grauwasser ist nach EN 12056-1 als fäkalienfreier, gering verschmutzter Teil des häuslichen Abwassers definiert und fällt beispielsweise beim Duschen, Händewaschen oder auch in der Waschmaschine an. Der Fokus liegt auf der Untersuchung der erforderlichen Quantitäten zur Erzielung möglichst großer Synergien der Effekte bzw. zur möglichen Optimierung eines Teilaspektes nach Bedarf im Anwendungsfall. In Langzeitversuchen wird dafür eine einfache Intensivdachbegrünung unter realen Einbaubedingungen und dem Einfluss wechselnder hydraulischer Belastungen in drei Standortbedingungen untersucht. Mit dem Einsatz von vorbehandeltem Grauwasser als nachhaltige Bewässerungsoption wird darüber hinaus die durch den Stoffeintrag bedingte Einflussnahme auf die Leistungsfähigkeit des Bodenkörpers beschrieben. Die Versuche dienen dem Aufbau einer Datengrundlage zur Validierung eigener erhobener Daten mit bereits vorhandenen, unter Laborbedingungen gewonnenen Forschungsergebnissen und deren möglicher Ergänzung. Folgende Fragestellungen sollen im Projekt betrachtet werden:

Welche Flächengröße einer einfachen Intensivbegrünung lässt sich mit einem typischen Anfall von Grauwasser bewässern, um eine geschlossene, vitale Vegetationsdecke unter realen klimatischen Bedingungen zu erzielen?

Wie wirken sich verschiedene durch Substratkennwerte gesteuerte Bewässerungsregime auf das Gesamterscheinungsbild und den Pflegeaufwand der Pflanzung, die Transpirationsleistung der Pflanzung, auf die kleinklimatische Situation (insbesondere die nächtliche Kühlwirkung), auf die Regenrückhaltung, auf Transport-, Abbau- und/oder Akkumulationsprozesse und auf die Gebäudekühlung bzw. Dämmwirkung aus.

Wie wirken sich Transport-, Abbau- und/oder Akkumulationsprozesse einzelner Wasserinhaltsstoffe insbesondere von Tensiden auf die Rückhaltekapazität eines Bodenkörpers aus und welchen Einfluss hat die Passage der Dachbegrünung auf die Emissionsbilanzen und Belastungsspitzen?

Bereits in den Zwischenberichten vorgestellte Themenbereiche, wie beispielsweise die Beschreibung des Messsystems, die Pflanzenauswahl oder die Festlegungen der zu untersuchenden Parameter der Bonituren werden in diesem Bericht nicht erneut aufgeführt, soweit in Aufbau und Funktionsweise keine Änderungen vorgenommen wurden.

## 2. Ausgangssituation Forschungsdach

### 2.1. Lage und Einrichtung des Versuchsdaches

Das Versuchsdach (Abbildung 2.1-1) als Forschungsgegenstand für dieses Projekt befindet sich auf dem Gelände des Botanischen Gartens der TU Dresden. Angegliedert an ein Verwaltungsgebäude stehen 240 m<sup>2</sup> Dachfläche zur Verfügung. Das Dach wurde auf dem nach den Angriffen des Zweiten Weltkrieg verbliebenen Sockelgeschoss des Verwaltungsgebäudes in Verbindung mit der Sanierung der Dachdichtung in 2014/2015 errichtet. Das Sockelgeschoss selbst ragt ca. 1,3 m über das umliegende Geländeniveau. Die Höhenlage ist vergleichbar mit einsehbaren Dachflächen bei höhengestaffelten Gebäuden oder Tiefgaragenbegrünungen und entspricht somit derzeit typischen Anwendungsbereichen von Einfachen Intensivbegrünungen und stellt eine reale Einbausituation dar. Da die Dachfläche sehr gut einsehbar ist, kann das Gründach neben der Forschung auch für Lehrzwecke der TUD und Umweltbildung für Besucher des Botanischen Gartens dienen.



*Abbildung 2.1-1: Vogelschau auf das Sockelgeschoss von Nord-Osten mit angrenzendem Eingangsbereich.*

Die Dachkonstruktion ist gekennzeichnet durch ein historisches Kappengewölbe, ausgebildet als Warmdach (einschaliges Dach mit Dachdichtung über Wärmedämmung) mit einer maximal zulässigen Auflast von 3 kN/m<sup>2</sup>. Die Dachdichtung ist mit 2 % Gefälle als wurzelfeste Dachabdichtung mit Elastomerbitumen-Schweißbahn hergestellt. Für das Projekt wurde auf dem gesamten Dach eine Einfache Intensivdachbegrünung mit 24 cm Gesamtaufbau bestehend aus einer Festkörperdrainage in 4 cm Stärke mit Filtervliesüberdeckung (Gewicht 105 g/m<sup>2</sup>) und einer 20 cm starken Substratschicht realisiert (Abbildung 2.1-3).

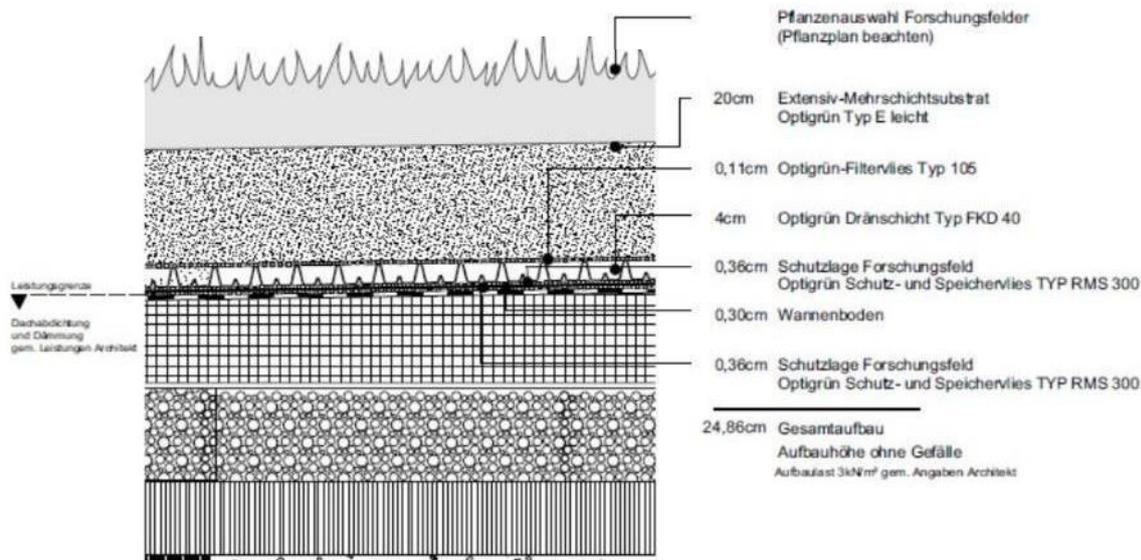


Abbildung 2.1-3: Konstruktives Detail für ein Forschungsfeld auf dem Versuchsdach.

Insgesamt 21 Forschungsfelder à 3,5 m<sup>2</sup> Flächengröße sind als Aluminiumwannen in die Grundbegrünung des 240 m<sup>2</sup> großen Daches integriert (Abbildung 2.1-2 und Abbildung 2.1-4). Die Ausbildung als wasserdichte Aluminiumwannen mit gezielten Ausflussöffnungen ist für eine exakte Ermittlung der verschiedenen Messwerte erforderlich. Die Einbindung in die Grundbegrünung des Daches stellt darüber hinaus ein Bestandsklima im Umfeld der Forschungsfelder sicher. Somit können bspw. Temperaturabweichungen in den Randzonen der Forschungswannen durch Sonneneinstrahlung auf die Wandung der Wannen durch direkt angrenzendes Substrat vermieden werden. Die Aluminiumwannen bestehen aus einem 3 mm starken Blech, das an den Rändern eine Umkantung mit einer Breite von 3 cm aufweist. Diese Umkantungen bleiben dauerhaft als Trennung der Forschungsfelder sichtbar. Jeweils an der topographisch tiefsten Stelle (alle Felder Grenzen an die umlaufende Dachentwässerungsrinne an) ist die Aluminiumwanne geschlitzt, um Abflüsse messen zu können.



Abbildung 2.1-2: Einbausituation mit Aluminiumwannen integriert in die Grundbegrünung.

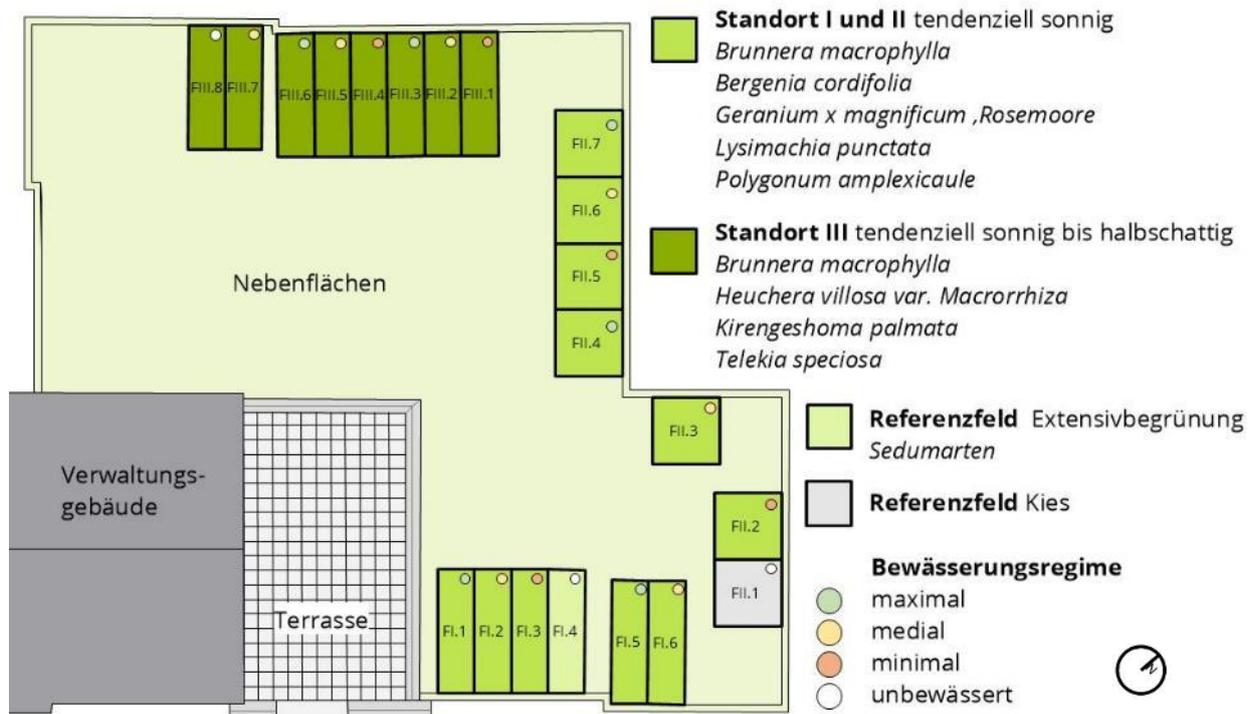


Abbildung 2.1-4: Schemaplan Anordnung Standorte auf dem Versuchsdach.

Als Substrat ist ein Extensiv-Mehrschichtsubstrat E-leicht der Firma Optigrün eingebaut (Eigenschaften in Tabelle 2-2). Das Substrat wurde gewählt, da es nach Herstellerangaben standardmäßig auch in Einfachen Intensivbegrünungen zum Einsatz kommt und damit dem Forschungsziel der Untersuchung einer typischen realen Dachbegrünungssituation entsprach. Der Aufbau ist angelehnt an den Regelaufbau ‚Naturdach‘ des Herstellers Optigrün. Weiterhin musste ein Optimum zwischen Schichtstärke und Auflast für das Dach gefunden werden (Auflastberechnung in Tabelle 2-1). Außerdem ist das Extensiv-Substrat bedingt durch den geringeren organischen Anteil weniger anfällig für Verdichtung wie sie bspw. durch Begehung verursacht wird. Da durch die Bonitur und Wartung der Forschungsflächen eine hohe Frequenz an Begehungen zu erwarten ist, wurde dies in der Substratwahl berücksichtigt.

Tabelle 2-1: Auflastberechnung für die Einfache Intensivdachbegrünung.

| Schicht                         | Fakto | Einzelgewicht     |                   | Gesamtgewicht     |                   |
|---------------------------------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                 |       | Gewicht trocken   | Gewicht nass      | Gewicht trocken   | Gewicht nass      |
| Einheit                         |       | kg/m <sup>2</sup> | kg/m <sup>2</sup> | kg/m <sup>2</sup> | kg/m <sup>2</sup> |
| <b>Schutzlage RMS 300</b>       | 1     | 0,30              | 2,30              | 0,30              | 2,30              |
| <b>Dränplatte FKD 40</b>        | 1     | 2,30              | 11,00             | 2,30              | 11,00             |
| <b>Filtervlies Typ 105</b>      | 1     | 0,11              | 0,11              | 0,11              | 0,11              |
| <b>Substrat E-leicht</b>        | 20    | 10,91             | 13,32             | 218,20            | 266,40            |
| <b>Gehölz-Stauden-Begrünung</b> | 1     | 1,00              | 15,00             | 1,00              | 15,00             |
| <b>Summe</b>                    |       |                   |                   | 221,91            | 294,81            |

Tabelle 2-2: Vergleich von Kenndaten für das eingesetzte Substrat mit Herstellerangaben und Laborwerten aus Analysen der Siedlungshydrologie.

| Kennwert                                    | Angabe Datenblatt<br>Hersteller  | Angabe Lieferschein<br>Fa. Gelsenrot (Lieferant)  | Ergänzende Werte<br>Laboranalyse                                       |
|---|--|---|--|
| Material<br>(Hauptbestandteile)             | Blähschiefer, Blähton, Lava, Bims, Ziegelsplitt, Porolith und Grünschnittkompost. Je nach Region in variabler Zusammensetzung. | Ziegelbruch (Ziegelsplitt), Ton (Tonschiefer, Blähton), pflanzliche Stoffe (aus Garten- und Landschaftsbau), Bodenmaterial (Unterboden) | Anteil von 70,4 % an Grobbestandteilen > 2 mm                          |
| Gewicht trocken<br>(verdichtet)             | mind. 750 kg/m <sup>3</sup> (leichte Variante)   | Keine Angabe  | 1030 kg/m <sup>3</sup><br>Trockenrohddichte                            |
| Gewicht wassergesättigt<br>(verdichtet)     | 1.140-1.440 kg/m <sup>3</sup> (leichte Variante)   | Keine Angabe  | 1430 kg/m <sup>3</sup> (berechnet aus Trockenrohddichte und Porosität) |
| max. Wasserkapazität                        | >= 35 Vol%   | Keine Angabe  | 37,2 – 40,1%   |
| pH-Wert                                     | 6,0 - 8,5  | 7,5   | 6,9  |
| Salzgehalt                                  | <= 3,5 g/l   | 3,4 g/l   |  |
| Wasserdurchlässigkeit                       | >= 0,6 mm/min  | Keine Angabe  |  |
| Verdichtungsfaktor                          | 1,2  | Keine Angabe  |  |
| organische Substanzen                       | < 65 g/l   | Produkt enthält wenig organische Substanzen   | 240 – 670 mg/l organischer Kohlenstoff im Ablaufwasser nach Einbau     |
| Gesamtporenvolumen                          | > 60 - 70 Vol%   | Keine Angabe  | 57,1 %   |
| Pflanzenverfügbare<br>(lösliche) Nährstoffe | Keine Angabe   | Stickstoff (N) max. 80 mg/l<br>Phosphat (P205) max. 200 mg/l<br>Kalium (K20) max. 700 mg/l<br>Magnesium (Mg) max. 200 mg/l              | 190 – 720 mg/l<br>Gesamtstickstoff im Ablaufwasser nach Einbau         |
| Weitere Nährstoffe und Nebenbestandteile    | Keine Angabe   | Schwefel (S) max. 916 mg/l  |  |

Die Form der durch die Aluminiumwannen begrenzten Forschungsfelder variiert zwischen Rechteck und Quadrat. Dies hängt im Wesentlichen mit den vorhandenen Entwässerungsgefällen auf dem Dach zusammen. Aufgrund der Gefälleordnung auf der Oberkante der wurzelfesten Dachabdichtung konnten gleichbleibende Formen nicht standsicher realisiert werden. Somit kommen an der Ostkante und an der Westkante des Daches rechteckige und an der Nordkante quadratische Forschungsfelder zum Einsatz (Abbildung 2.1-4). Diese Anordnung wird parallel dazu genutzt, drei sogenannte Standorte auszubilden, die durch leicht unterschiedliche Lichtverhältnisse für die Pflanzungen gekennzeichnet sind (Abbildung 2.2-1 und Abbildung 2.2-2, S. 31). Jeweils ein Forschungsfeld eines Standortes war als sogenanntes Referenzfeld als Kiesdach ausgebildet, um die Eigenschaften und Prozesse in den Forschungsfeldern mit der noch immer häufig verwendeten Dachform des Kiesdaches gegenüberzustellen. Alle weiteren Forschungsfelder eines Standortes werden mit Stauden und Gräsern bepflanzt (Kapitel 2.2 Pflanzenauswahl).

Die Felder sind mit Sensoren ausgestattet (Kapitel 2.3 Messeinrichtung), Hydra Probes ermitteln Wassergehalt, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur; Temperaturlanzen – vertikales Temperaturprofil; LORA-Sensoren für Temperatur, Luftfeuchtigkeit und

Wärmeflussplatten zur Messung von Wärmestromdichte. Somit bieten sich direkte Vergleichsmöglichkeiten in Bezug auf Bodenfeuchte, Bodentemperatur, elektrischer Leitfähigkeit, vertikalem Temperaturprofil und Lufttemperatur über dem Feld, Luftfeuchtigkeit und Wärmefluss.

#### Umwandlung Kiesdächer in unbewässerte Referenzfelder



*Abbildung 2.1-5: Drohnenaufnahme des Extensiv-Feldes FI.4 am 10.08.2021.*

Die anfänglich als Kiesdächer ausgebildeten Referenzfelder FI.4 am Standort I und FIII.8 am Standort III wurden 2021 umgebaut, um differenziertere Daten zu unbewässerten Vergleichsfeldern erheben zu können. In Abbildung 2.1-6 sind die Felder verortet. Das Feld FI.4 (Abbildung 2.1-5) wurde zu einem extensiven Gründach umgerüstet. Es wurde eine derzeit in der Praxis übliche Substratstärke von 10 cm und einer Begrünung mit Sprossen/Ansaat mit Sedumarten gewählt. Als Substrate/Dränage wurde das identische Material wie in den übrigen Feldern eingesetzt. Die Anlage erfolgte am 06.05.2021 und die Aussaat am 29.06.2021. Nach einer zweimonatigen Fertigstellungspflege bleibt das Feld unbewässert.

Das Feld FIII.8 wurde mit dem gleichen Aufbau wie die restlichen Forschungsfelder hergestellt und wurde am 29.06.2021 nach dem Pflanzplan der Felder aus Standort III bepflanzt. Auch hier schloss sich eine Fertigstellungspflege mit Bewässerung an, die am 31.08.2021 eingestellt wurde.

#### *Grauwassergewinnung*

Das Forschungsdach soll die Frage beantworten, ob mit Grauwasser eine Bewässerung eines Gründaches sichergestellt werden kann und welche Auswirkungen eine Bewässerung mit aufbereitetem Grauwasser auf verschiedene Parameter des Gründaches hat. Die Bewässerung erfolgt mittels aufbereitetem Grauwasser, ausgeleitet aus dem Verwaltungsgebäude. Hier sind die Sozial- und Waschräume des Personals verortet, wodurch ein kontinuierlicher Grauwasseranfall gegeben ist (Kapitel 5.1.1 Wasserversorgung). Die Ausleitung des Grauwassers ist unter Mitwirkung des Baudezernates der TU Dresden in die 2014 in Umsetzung befindliche Planung der Leitungen integriert und finanziert worden.

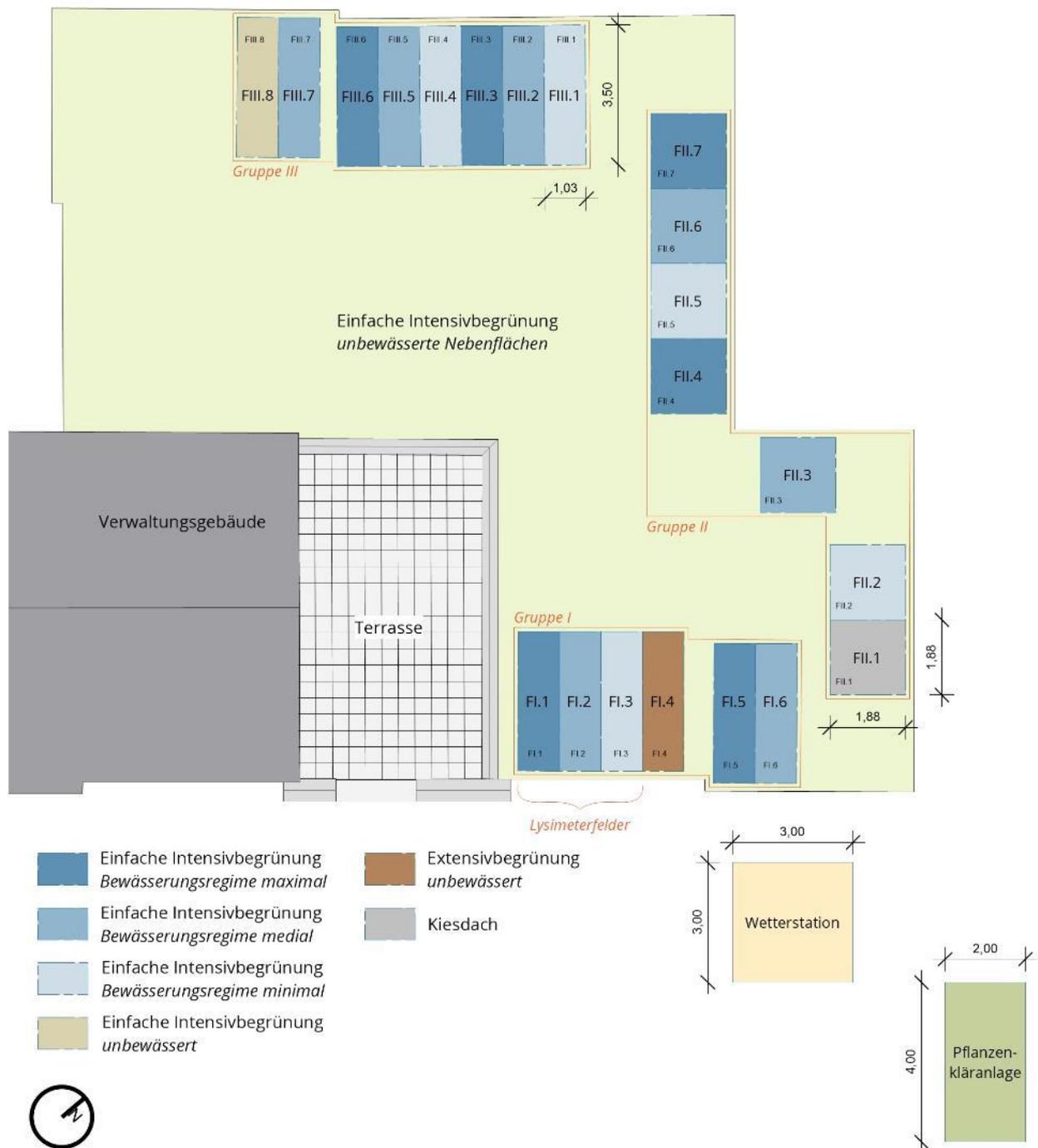


Abbildung 2.1-6: Übersichtsplan Gründach mit Beschriftung der Felder und Bewässerungsregime.

Lohaus 2015 hat nachgewiesen, dass mit einem Grauwasseranfall in Privathaushalten grundsätzlich eine Bewässerung angrenzender Pflanzungen sichergestellt werden könnte. Für den Botanischen Garten waren im Vergleich höhere Grauwassermengen zu erwarten, da neben Handwaschwasser auch Durchwasser sowie Waschwasser von Waschmaschinen ausgeleitet wird. Rechnungen zum Grauwasserverbrauch im Vorfeld des Projektes haben ergeben, dass die anfallende Wassermenge anhand von Verbrauchszahlen zwischen 2014 und 2018 für die Bewässerung der Forschungsfelder ausreichen kann. Der Mengenberechnung lagen die Angaben der FLL Bewässerungsrichtlinie zu Grunde (FLL 2015). Mengenempfehlungen für regelmäßige

Bewässerung von Staudenflächen wurden auf die Dachsituation übertragen und deren möglicher Bedarf und die Bewässerungshäufigkeit überschlägig zunächst errechnet. Letztendlich wurde die Bewässerungsmengen jedoch auf Basis von Ergebnissen aus Laborversuchen abgeleitet und gezielt auf das verwendete Substrat abgestimmt (Kapitel 5.2.1 Grauwasser). Die Aufbereitung der Grauwassers erfolgt über eine Pflanzenklär-anlage (Abbildung 2.1-7).



*Abbildung 2.1-7: Pflanzenkläranlage zur Vorreinigung des aus dem Verwaltungsgebäude ausgeleiteten Grauwassers.*

Das Grauwasser aus dem Gebäude wird zunächst in einem Vorseicher (Volumen  $3,5 \text{ m}^3$ ) gesammelt, dann per Pumpe der Pflanzenkläranlage zugeführt und anschließend in einem Nachspeicher (Volumen  $3,5 \text{ m}^3$ ) gesammelt. Aus dem Nachspeicher wird bedarfsabhängig das Wasser auf das Dach gepumpt. Für die Bewässerung der Forschungsfelder wurde eine herkömmliche Tröpfchenbewässerung realisiert (Abbildung 2.1-8), die sich je Forschungsfeld ansteuern lässt und eine handelsübliche Lösung zur Bewässerung darstellt, um die Untersuchungen praxisnah durchzuführen. Die Tropfschläuche mit einem Tropferabstand von  $33 \text{ cm}$  sind gemäß den Herstellerempfehlungen in einem Abstand von  $30 \text{ cm}$  verlegt worden. Die Tropfleistung der eingesetzten Schläuche beträgt  $2,3 \text{ l/h}$  pro Tropfer.



Abbildung 2.1-8: Eingebaute Tröpfchenbewässerung in Forschungsfeld FII.2 an Standort II.

### 2.1.1. Exkurs Feldgröße Forschungsfelder

Die in 2.1 beschriebenen Aluminium-Wannen dienen als Aufnahme­flächen der Testpflanzungen. Nach FISCHER & KLOTZ 1996 sind diese Aufnahme- bzw. Dauerbeobachtungsflächen „räumlich zusammenhängende, dauerhaft festgelegte, in der Regel markierte Ausschnitte einer Phytozönose, auf denen der Zustand der Vegetation (Bsp.: Artmächtigkeiten, Biomasse, Strukturmerkmale usw.) mit identischer Methode wiederholt erfasst wird.“

Zur Dimensionierung der Forschungsfelder wurden publizierte, praktische Untersuchungen vergleichend herangezogen. Versuche aus Weihenstephan zu Anwuchsverhalten und Bestandsentwicklung von Stauden nutzen eine Feldgröße von 2 m<sup>2</sup> (KÖNIG 2011). SCHÖNFELD 2014 nutzt für Untersuchungen an beschatteten Extensivdachaufbauten ca. 4 m<sup>2</sup> große Aufnahme­flächen. Für das Forschungsprojekt werden beziehungsweise auf vergleichbare Projekte und Literaturhinweise und bedingt durch die Rahmenbedingungen der vorhandenen Dachfläche Forschungsfelder von 3,5 m<sup>2</sup> eingesetzt.

## 2.2. Pflanzenauswahl

### 2.2.1. Standortbedingungen

Neben dem technischen Aufbau als solches spielt auch die Pflanzenauswahl eine wesentliche Rolle für das Forschungsprojekt. Für die Auswahl sind das verwendete Substrat sowie die Lichtverhältnisse entscheidende Einflussgrößen. Wie eingangs in Abschnitt 2 erläutert, ist das Dach durch seine besondere Lage in nur 1,3 m über dem umliegenden Geländeniveau gekennzeichnet. Demzufolge haben aber auch höhere Gebäudeteile und Großgehölze im Umfeld eine beschattende Wirkung auf Teile des Daches und es ergeben sich unterschiedliche Lichtverhältnisse der Pflanzenstandorte (Abbildung 2.2-1 und Abbildung 2.2-2). Die im zunächst im Antrag vorgesehene Kategorisierung der drei geplanten Standorte in *tendenziell schattig* an der Nordwestkante des Daches, *tendenziell halbschattig* an der Nordkante des Daches und *tendenziell sonnig* an der Südostkante stimmt nach der Schattenanalyse und dem Abgleich mit der Standortdefinition gängiger Literatur nicht mit den tatsächlichen Verhältnissen überein (Tabelle 2-3). Daher werden die Standorte im Projekt nicht gemäß Antrag anhand der Lichtverhältnisse, sondern lediglich anhand ihrer Lage auf dem Dach angegeben.

Tabelle 2-3: Lichtverhältnisse der Standorte auf dem Forschungsdach mit Bezug zu Standorteigenschaften gem. Literatur.

| Standort<br>Forschungsdach  | Standorteigenschaften nach<br>REIF 2010   | Standorteigenschaften<br>Forschungsdach zum<br>30. Juli   | Standorteigenschaften<br>Forschungsdach zum 30.<br>März   |
|---|---|---|---|
| <b>Standort I</b><br>- Gem. Antrag<br><b>tendenziell sonnig</b><br>→ Gem. Literatur<br><b>zutreffend</b>                  | Lichteinfluss auf die Pflanzen von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang bzw. mindestens von Sonnenaufgang bis Mittag oder Mittag bis Sonnenuntergang und jeweils länger | Von Sonnenaufgang bis 6:30 im Schatten umliegender Gehölze, bis 13:00 Uhr voll besont, von 13:00 – 18:00 Uhr partieller Schlagschatten des Gebäudes   | Von Sonnenaufgang bis 7:30 Uhr im Schatten umliegender Gehölze, bis 15 Uhr voll besont, ab 15:00 Uhr im Gebäudeschatten   |
| <b>Standort II</b><br>- Gem. Antrag<br><b>tendenziell halbschattig</b><br>→ Gem. Literatur<br><b>tendenziell sonnig</b>   | Lichteinfluss auf die Pflanzen für ca. 4 Stunden am Tag oder 2,5 Stunden in der Zeit von 10:00 bis 14:00 Uhr  | Von Sonnenaufgang bis 8:00 Uhr im Schatten umliegender Gehölze, bis 17:30 Uhr voll besont, ab 17:30 Uhr partieller Schlagschatten umliegender Gehölze | Von Sonnenaufgang bis 8:30 Uhr im Schatten umliegender Gehölze, bis 13:00 Uhr voll besont, ab 13:00 Uhr partieller Schlagschatten des Gebäudes, später umliegender Gehölze      |
| <b>Standort III</b><br>- Gem. Antrag<br><b>tendenziell schattig</b><br>→ Gem. Literatur<br><b>halbschattig bis sonnig</b> | Lichteinfluss auf die Pflanzen für ca. 2 Stunden am Tag oder 1 Stunden in der Zeit von 11:00 bis 13:00 Uhr  | Von Sonnenaufgang bis 7:00 Uhr im Schatten umliegender Gehölze, bis 17:00 Uhr voll besont, ab 17:00 Uhr partieller Schlagschatten umliegender Gehölze | Von Sonnenaufgang bis 8:00 Uhr im Schatten umliegender Gehölze, von 10:00 bis 12:00 Uhr partiell im Gebäudeschatten, ab 15:30 Uhr partieller Schlagschatten umliegender Gehölze |

Die Pflanzenauswahl wurde entsprechend angepasst. Sowohl das Gebäude, als auch die hohen Bäume im Umfeld beeinflussen das Windfeld auf dem Gründach und den mit dem Wind verdrifteten Niederschlag.

Ein bedeutsamer Einflussfaktor neben den bautechnischen Voraussetzungen ist die Lage des Daches im Botanischen Garten, einer wissenschaftlichen Einrichtung der TU Dresden. Die Pflanzenauswahl auf dem Dach musste entsprechend sorgfältig auf den vegetativen Bestand des Gartens angepasst werden, um Einkreuzungen von extern eingebrachten Pflanzen mit dem Pflanzenbestand des Botanischen Gartens zu vermeiden. Gleichmaßen sollten aber auch Erkenntnisse vorhergehender Untersuchungen berücksichtigt werden. Um die Auswahl dementsprechend zu strukturieren, wurde ein dreistufiges Auswahlverfahren für die Pflanzen entwickelt und angewendet.



Abbildung 2.2-1: Schattendiagramm aus 3D-Modell mit Sonnenverlauf für Dresden am 30. März um 9:00, 12:00 und 16:00.

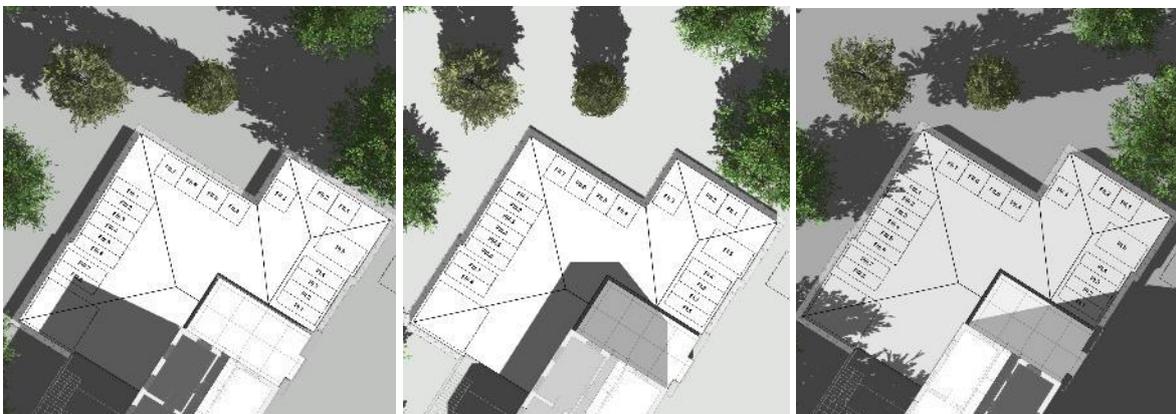


Abbildung 2.2-2: Schattendiagramm aus 3D-Modell mit Sonnenverlauf für Dresden am 30. Juli um 9:00, 12:00 und 16:00.

### 2.2.2. Auswahlverfahren Pflanzen

In einem ersten Schritt erfolgte eine Pflanzenauswahl anhand der gegebenen Standorteigenschaften sowie gängiger Listen für Dachbegrünungen. Für die Forschungsfelder wurde anstatt der für Dachbegrünungen typischerweise verwendeten und an trockene und nährstoffarme Dachstandorte angepassten Arten eine Artenauswahl für frische Lebensbereiche eingesetzt. Hintergrund ist die grundlegende Versuchsanordnung die Pflanzungen zu bewässern und die Effekte zu beurteilen. Eine genau Zuordnung der Lebensbereiche zeigt Tabelle 2-4.

Vorangegangene Untersuchungen zu Gründachpflanzungen und deren Verdunstungsverhalten haben gezeigt, dass xeromorphe Arten, also Arten mit Anpassungsstrategien an Trockenstress, nur schwer in der Lage sind, geschlossene Bestände zu erreichen (KOLB, SCHWARZ 1985). Ein geschlossener Bestand ist jedoch relevant, um das Verdunstungspotenzial einer Pflanzung voll auszuschöpfen und über die Deckung die Evaporation des Substrates zu reduzieren. Des Weiteren sind ebendiese xeromorphen Arten für die Fragestellung tendenziell ungeeignet, da sie als Strategie zur Vermeidung von Wasserverlust in bestimmten Situationen weniger verdunsten, da die Stomata als „Verdunstungsventil“ verschlossen werden (WEIß 2016). Zum anderen zeigen Untersuchungen zu Sumpfdächern, dass Pflanzenarten aus frischen oder sumpfigen Standorten bei ausreichender Wasserverfügbarkeit ein entsprechend hohes Verdunstungspotenzial auch in den heißen Sommermonaten aufweisen (ZEHNSDORF 2018). Arten aus frischen Heimatstandorten eignen sich demnach besonders für die Untersuchung optimaler Verhältnisse zwischen Wasserdargebot und Verdunstungsleistung. Zudem sind trockenheitsliebende Arten mit tendenziell kleineren Blättern und damit einer geringeren Blattoberfläche bezogen auf die Gesamtpflanze ausgestattet. Um das Verdunstungspotenzial einer Vegetationsfläche zu untersuchen, ist es daher sinnvoll, Arten mit höherer Blattmasse und -oberfläche einzusetzen. Bei der Auswahl wurden zudem Arten eingesetzt, die als Ubiquisten bekannt sind, also weit verbreitete Arten ohne besondere Bindung an bestimmte Biotope und mit breiter Standortamplitude.

Ergänzend wurden bei der Auswahl der Arten Forschungsergebnisse abgeschlossener Projekte mit Pflanzungen für Gründächer einbezogen, sodass bereits gewonnene Erkenntnisse zur Eignung von Arten berücksichtigt werden konnten. Hier ist insbesondere das Projekt „Optimierung der Evapotranspirations- und Kühlleistung extensiver Dachbegrünungen durch gezielte Nutzung von Grauwasser“ “ der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (2012-2015) zu erwähnen. Das Projekt lieferte insbesondere für die Grauwasserverträglichkeit und Verdunstungsleistung einzelner Arten hilfreiche Hinweise.

Nach diesem Abgleich erfolgte die Prüfung der Artenauswahl auf Eignung durch die wissenschaftliche Leitung des Botanischen Gartens. Arten, die dabei als geeignet und nicht risikoreich im Sinne einer Einkreuzung vorhandener Arten eingestuft wurden, haben im Projekt Anwendung gefunden. Der beschriebene Ablauf fand sowohl für die Forschungsfelder als auch für die Grundbegrünung statt. In der Folge kamen jedoch

verschiedene Arten, trotz ihrer Eignung für Dachbegrünungen nicht zum Einsatz, um ein Einkreuzen von Gärtnerware in den Pflanzenbestand des Botanischen Gartens zu vermeiden. Die Entwicklung der Artenauswahl für die Forschungsfelder wurde durch die Professur für Pflanzenverwendung an der TU Dresden, seinerzeit unter Leitung von Vertretungs-Professor Alexander von Birgelen später als Juniorprofessur unter Jun.-Prof. Dr. Martin Hellbach begleitet.

Im Ergebnis werden zwei Artenszusammensetzungen für die Forschungsfelder festgelegt (Tabelle 2-4), wobei eine Artenszusammensetzung auf dem Standort III zum Einsatz kommt und eine zweite sowohl auf dem Standort I als auch dem Standort II. Alle verwendeten Arten haben einen Lebensbereich zwischen GR2 (Gehölzrand mit frischen Böden) und Fr2 (Freifläche mit Wildstaudencharakter auf frischen Böden).

Tabelle 2-4: Artenauswahl der Forschungsfelder nach Standort mit Angabe des Lebensbereiches.

| Standort  | Botanischer Name                                | Deutscher Name            | Lebensbereich | Stk./ Feld |
|---|---|---------------------------|---------------|------------|
| <b>Standort I und II tendenziell sonnig</b>             |   |                           |               |            |
| <b>Füllstaude</b>                                       | <i>Brunnera macrophylla</i>                     | Kaukasus-Vergissmeinnicht | GR/G2         | 9          |
| <b>Füllstaude</b>                                       | <i>Bergenia cordifolia</i>                      | Altai-Bergenie            | GR2/Fr2       | 6          |
| <b>Füllstaude</b>                                       | <i>Geranium x magnificum</i> ‚Rosemoore‘        | Pracht-Storchschnabel     | GR2/Fr2-3     | 8          |
| <b>Begleitstaude</b>                                    | <i>Lysimachia punctata</i>                      | Gelbweiderich             | GR/G2         | 4          |
| <b>Leitstaude</b>                                       | <i>Polygonum amplexicaule</i>                   | Kerzen- Knöterich         | GR2/FR2-3     | 2          |
| <b>Standort III tendenziell sonnig bis halbschattig</b> |   |                           |               |            |
| <b>Füllstaude</b>                                       | <i>Brunnera macrophylla</i>                     | Kaukasus-Vergissmeinnicht | GR/G2         | 7          |
| <b>Füllstaude</b>                                       | <i>Heuchera villosa</i> var. <i>Macrorrhiza</i> | Purpurglöckchen           | GR2/Fr2b      | 16         |
| <b>Begleitstaude</b>                                    | <i>Kirengeshoma palmata</i>                     | Wachsglocke               | GR/G2         | 4          |
| <b>Leitstaude</b>                                       | <i>Telekia speciosa</i>                         | Telekie                   | GR2/Fr2-3     | 2          |

### 2.2.3. Pflanzprinzip

#### *Forschungsfelder*

Die Forschungsfelder wurden zu Projektbeginn im Mai 2020 mit einer Mischpflanzung bestehend aus den im vorherigen Kapitel benannten Arten versehen (Abbildung 2.2-3). Um einen möglichst flächendeckenden Bestand zu erreichen, wurden entsprechend Leit-, Begleit- und Füllstauden eingesetzt (Tabelle 2-4). Das Pflanzprinzip ist für alle drei Standorte identisch. Die Artenauswahl weicht am Standort III von den Standorten I und II ab.

Die Pflanzdichte für die Forschungsfelder wurde zu Versuchszwecken anhand des Maßstabs für Freilandpflanzungen und nicht gemäß der Dachbegrünungsrichtlinie ausgewählt (Tabelle 2-5). Die Dachbegrünungsrichtlinie weist pauschal eine Dichte von 16 Pflanzen je Quadratmeter für Topfware aus, ohne Angaben zur Geselligkeit zu berücksichtigen. Mit Blick auf die Untersuchungen zu regelmäßiger Wassergabe in den Feldern, die ein stärkeres Pflanzenwachstum erwarten lassen, wurde die dichte tendenziell an den im Freiland gültigen arten- und sortenspezifischen Mengenangaben orientiert, jedoch mit Blick auf eine gewünschte schnelle Bedeckung der Flächen um etwa ein Drittel dichter gewählt. Es ist davon auszugehen, dass sich durch regelmäßige Bewässerung trotz geringerer Pflanzdichte je Quadratmeter kurzfristig ein geschlossener

Bestand etabliert. Weitergehende Herleitungen der Bepflanzung und eine Dokumentation von Nachpflanzungen sind den Zwischenberichten 1 und 2 zu entnehmen.

Tabelle 2-5: Übersicht über die Pflanzdichte je Standort auf dem Dach.

| Standort     | Pflanzdichte                    |
|--------------|---------------------------------|
| Standort I   | 8,57 Pflanzen je m <sup>2</sup> |
| Standort II  | 8,57 Pflanzen je m <sup>2</sup> |
| Standort III | 8,29 Pflanzen je m <sup>2</sup> |

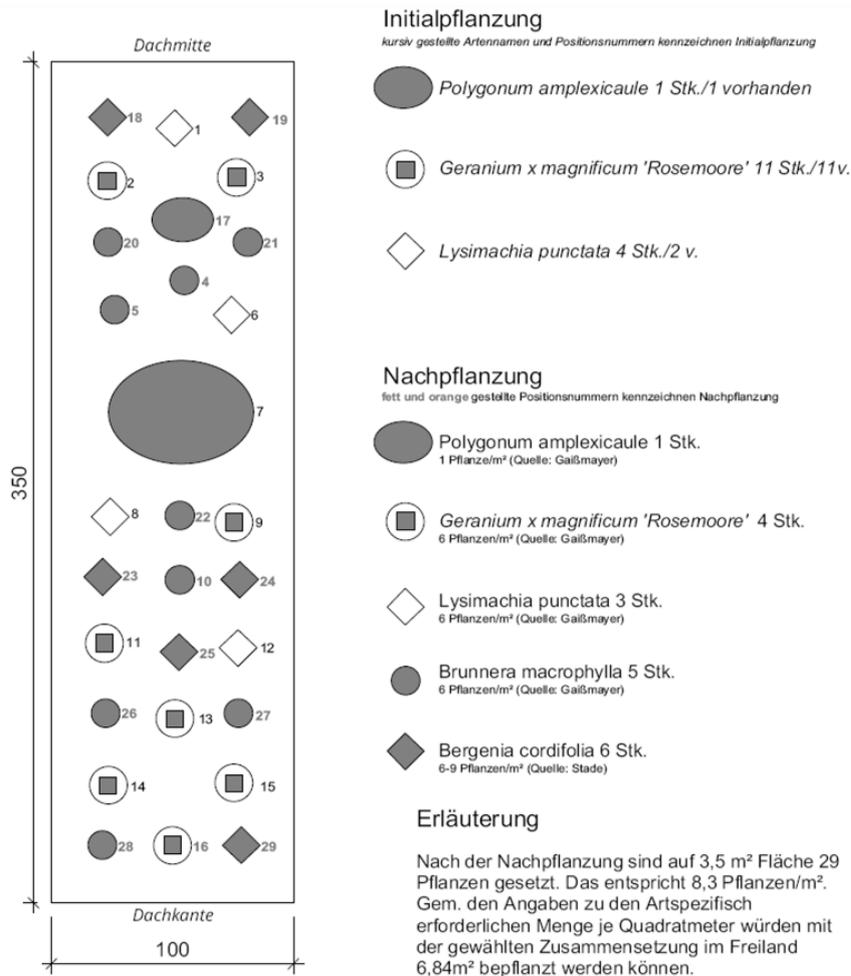


Abbildung 2.2-3: Beispielhafter Pflanzplan Forschungsfeld Fl.5 (Standort I – tendenziell sonnig), mit Positionsnummern für Initial- und Nachpflanzung.

### Pflanzprinzip Grundbegrünung

Die Grundbegrünung ist als Staudenmischpflanzung mit Leit-, Begleit- und Füllstauden angelegt. Die Artenzusammensetzung berücksichtigt das natürliche Wasserdargebot. Die Grundbegrünung wird nicht ergänzend bewässert. Die eingesetzten Arten weisen demnach zu einem großen Teil Lebensbereiche des Freilands mit trockenen Standorten oder auch Steinlagen mit tendenziell nährstoffarmen Böden auf und entstammen zu einem größtenteils Listen mit nachweislicher Eignung für eine nicht bewässerte einfache Intensivdachbegrünung (siehe Tabelle 2-6).

In der Grundbegrünung wurden im Jahr 2021 Pflanzen ergänzt, die im Wesentlichen im Lebensbereich der Steppenheide angesiedelt sind. Die Setzung erfolgt ohne Pflanzplan als Mischpflanzung. Für die Mengenermittlung sind nicht bedeckte Areale flächenmäßig aufgenommen worden (ca. 50 m<sup>2</sup>). Die Artenzusammensetzung für die Nachpflanzung ist Tabelle 2-7 zu entnehmen.

Tabelle 2-6: Artenliste Initialpflanzung Grundbegrünung Gründach Botanischer Garten.

| Botanischer Name                                    | Deutscher Name             | Lebensbereich | Menge pro m <sup>2</sup> | Eingesetzte Stk. |
|---|----------------------------|---------------|--------------------------|------------------|
| <b>Acaena microphylla 'Kupferteppich'</b>           | Braunrotes Stachelnüsschen | St/FS/M/Fr1-2 | 11                       | 5                |
| <b>Aster ericoides 'Snowflurry'</b>                 | Teppich-Myrten-Aster       | St/MK/FS/GR2  | 4                        | 46               |
| <b>Centranthus ruber 'Rosenrot'</b>                 | Spornblume                 | Fr1/St/FS1-2  | 4                        | 8                |
| <b>Dianthus carthusianorum</b>                      | Karthäuser-Nelke           | Fr/SH/H1      | 11                       | 13               |
| <b>Epimedium x warleyense 'Orangekönigin'</b>       | Elfenblume                 | G2/GR2-3      | 11                       | 30               |
| <b>Euphorbia griffithi 'Fireglow'</b>               | Himalaya-Wolfsmich         | Fr/GR2        | 4                        | 3                |
| <b>Geranium 'Rozanne'</b>                           | Storchschnabel             | B2            | 4                        | 19               |
| <b>Helictotrichon sempervirens 'Saphiersprudel'</b> | Blaustrahlhafer            | Fr/St/FS1     | 3-5                      | 5                |
| <b>Hemerocallis Hybride 'Joan Senior'</b>           | Taglilie                   | B/Fr/GR2      | 4                        | 9                |
| <b>Heuchera Hybride 'Black Beauty'</b>              | Garten-Prurpurglöckchen    | GR/Fr2        | 6-8                      | 16               |
| <b>Hosta Hybride 'Brim Cup'</b>                     | Funkie                     | G/GR2         | 5-7                      | 5                |
| <b>Hosta plantaginea 'Honeybells'</b>               | Lilien-Funkie              | B/GR2-3       | 3-5                      | 9                |
| <b>Iris barbata-nana 'Orange Tiger'</b>             | Zwerg-Iris                 | St/B/Fr1      | 25                       | 23               |
| <b>Lavandula angustifolia 'Dwarf Blue'</b>          | Garten-Lavendel            | Fr/FS/SH1b    | 11                       | 22               |
| <b>Linum perenne</b>                                | Stauden-Lein               | Fr/SH/St/FS1  | 11                       | 32               |
| <b>Origanum vulgare</b>                             | Echter Dost                | Fr/SH/St/FS1  | 11                       | 16               |
| <b>Perovskia atriplicifolia 'Little Spire'</b>      | Kleine Blauraute           | Fr1           | 1                        | 1                |
| <b>Phlox subulata 'Atropurpurea'</b>                | Polster-Phlox              | St/MK/FS1-2   | 11                       | 20               |
| <b>Phlox subulata 'Amazing Grace'</b>               | Polster-Phlox              | St/MK/FS1-2   | 11                       | 10               |
| <b>Sedum caudicola 'Bertram Anderson'</b>           | Purpur-Fetthenne           | St/FS/M/MK1   | 16                       | 21               |
| <b>Sedum Hybride 'Purple Emperor'</b>               | Purpur-Fetthenne           | Fr/St/FS/B1   | 4                        | 21               |
| <b>Stachys grandiflora 'Superba'</b>                | Purpur-Ziest               | GR/Fr2b       | 6                        | 9                |
| <b>Thymus doerfleri 'Bress. Seed.'</b>              | Polster-Thymian            | St/FS/M1      | 16                       | 35               |
| <b>Thymus longicaulis ssp. Odoratus</b>             | Kaskaden-Thymian           | St/FS/M1      | 6                        | 40               |
| <b>Thymus serpyllum 'Albus'</b>                     | Weißer Sand-Thymian        | St/M/Fr/H1    | 16                       | 35               |
| <b>Allium schoenoprasum 'Forescate'</b>             | Purpur-Schnittlauch        | Fr/B1-2       | 11                       | 150              |

Tabelle 2-7: Artenliste Nachpflanzung Nebenflächen Frühjahr 2021.

| Botanischer Name              | Sorte           | Lebensbereich        | Herkunft           |
|-------------------------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| <b>Anaphalis triplinervis</b> | „Sommerschnee“  | Fr/FS/St1-2 / so     | Gärtnerware        |
| <b>Aster linosyris</b>        |                 | SH/Fr1 / so          | Gärtnerware        |
| <b>Calamintha nepeta</b>      |                 | Fr/FS/St1 / so,as,hs | Gärtnerware        |
| <b>Cerastium tomentosum</b>   | 'Silberteppich' | Fr/St/MK1 / so       | Gärtnerware        |
| <b>Euphorbia cyparissias</b>  |                 | FS/Fr/SH/GR1 / so    | Gärtnerware        |
| <b>Geranium sanguineum</b>    |                 | GR/Fr/St/SH1 / so    | Botanischer Garten |
| <b>Iberis sempervirens</b>    | 'Schneeflocke'  | St/SF/MK1 / so,as    | Gärtnerware        |
| <b>Koeleria glauca</b>        |                 | Fr/SH/St1 / so       | Gärtnerware        |
| <b>Luzula nivea</b>           |                 | GR2/G1-2 / hs,sc     | Gärtnerware        |
| <b>Melica ciliata</b>         |                 | St/FS/Fr/SH1 / so,as | Gärtnerware        |
| <b>Pulsatilla vulgaris</b>    |                 | SH/Fr/St/FS1 / so    | Gärtnerware        |
| <b>Stipa capillata</b>        |                 | Fr/SH/St/FS1 / so    | Gärtnerware        |
| <b>Teucrium chamaedrys</b>    |                 | St/FS/SF1-2 / so     | Gärtnerware        |

### 2.3. Messeinrichtung

Für die Erfassung von Messdaten über die gesamte Dachkonfiguration ist ein komplexes Messsystem mit mehr als 200 Sensoren eingerichtet. Die verschiedenen Messgruppen werden im Folgenden kurz vorgestellt. Die Forschungsinfrastruktur ist als gesondertes Projekt über die DFG im Rahmen des Programms „Großgeräte der Länder“ gefördert worden. Die gewonnenen Daten bilden die Prozesse im Dach umfangreich ab und erlauben eine gezielte Auswertung diverser Fragestellungen der beteiligten Professuren. Die Abbildung 2.3-1 zeigt den schematischen Aufbau der Messeinrichtung, Tabelle 2-8 zeigt die eingesetzten Sensoren mit Messzweck und Messbereich.

Für die Implementierung des Messsystems haben sich, bedingt durch die Corona-Pandemie beginnend im Frühjahr 2020, umfangreiche Verzögerungen ergeben. Die Ursachen waren dabei verschiedenartig beginnend bei Lieferengpässen bis hin zu Kontakteinschränkungen während des Einbaus. Entsprechend hat sich auch die Inbetriebnahme verzögert. Da für die hochaufgelöste Erfassung von Wasser- und Stoffgrößen im Messsystem nicht für alle Aspekte Standardlösungen zur Verfügung standen, wurden teilweise spezifische Messansätze entwickelt. Einzelne Teilsysteme wurden laufend weiterentwickelt und optimiert, um die angestrebte Genauigkeit zu erreichen. Im Folgenden wird an entsprechender Stelle im Bericht darauf hingewiesen.

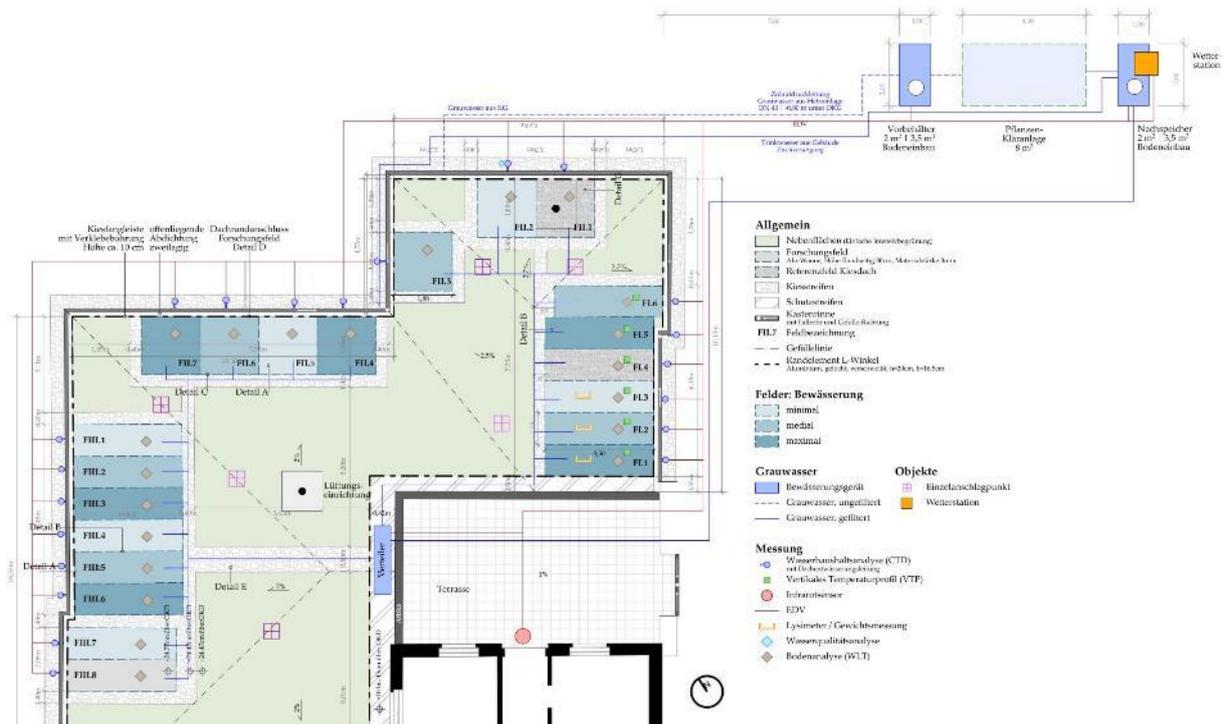


Abbildung 2.3-1: Schema des Messsystems im Botanischen Garten. Bearbeitete Abbildung auf Grundlage von Hänicke 2022, S. 55/56. Eine Vergrößerung der Abbildung findet sich unter 10.4. im Anhang.

Tabelle 2-8: Übersicht zu eingesetzten Sensoren und Messbereichen.

| Sensor Gruppe         | Variablen   | Sensortyp  | Range  |
|-----------------------|---|--|--|
| <b>Klima</b>          | relative Luftfeuchte<br>Temperatur<br>Luftdruck<br>Windgeschwindigkeit<br>Windrichtung<br>Kurzwellige Strahlung<br>Langewellige Strahlung<br>Niederschlag | Kapazitiv<br>Band-gap<br>Kapazitiv<br>Propeller<br>Potentiometer<br>Pyranometer<br>Pyrgometer<br>Kippwaage | 0 – 100 %<br>-30 - +70 °C<br>0.5 - 1.2 bar<br>0 - 100 m/s<br>0 - 360°<br>0.3 - 2.8 µm<br>4.4 - 50 µm<br>0 - 100 mm/h |
| <b>Bauklimatik</b>    | relative Luftfeuchte<br>Temperatur<br>Wärmestromdichte<br>Oberflächentemperatur   | Kapazitiv<br>Pt 100<br>Wärmeflussplatte<br>Infrarot  | 0 - 100 %<br>-30 - +70 °C<br>-0.2 - 0.2 kW/m²<br>-40 - 200 °C  |
| <b>Lysimeter</b>      | Gewicht<br>Fließrate  | Kapazitiv<br>Kippzähler  | 0 - 2000 kg<br>0 - 6 l/s   |
| <b>Substrat</b>       | Temperatur<br>Wassergehalt<br>Elektr. Leitfähigkeit   | Pt 100<br>Permittivität<br>Permittivität   | -20 - 50 °C<br>0 - 100 %<br>0.01 - 1.5 S/m   |
| <b>Zu-/Abfluss</b>    | Fließrate<br>Wasserstand  | MID<br>Kapazitiv   | 0 - 30 l/s<br>0 - 1 m  |
| <b>Wasserqualität</b> | Temperatur<br>Elektr. Leitfähigkeit<br>Nitrat, Nitrit<br>TOC, DOC<br>Trübung/TSS  | Pt 100<br>Kapazitiv<br>Spektrometrie<br>Spektrometrie<br>Spektrometrie                                     | 0 - 50 °C<br>0 - 2 S/m<br>3 - 70 mg/l<br>2 - 300 mg/l<br>1 - 200 NTU   |

### 2.3.1. Wasserversorgung

Das System erfasst die Wassermengen an verschiedenen Stellen. Dies erfolgt u.a. mittels Durchflussmessern. So wird zum einen der Zulauf aus dem Gebäude in den Vorkörper der Pflanzenkläranlage mit dem magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID) Siemens SITRANS FM MAG 5000 aufgezeichnet, wodurch zeitlich periodische Schwankungen des Wasseranfalls sichtbar werden und für künftige Bewässerungsstrategien mit Nutzung von Grauwasser eingeplant werden können. Zulauf (MID, IFM SM9004) und Ablauf (MID, IFM SM8004) der Pflanzenkläranlage werden in zeitlich hoher Auflösung erfasst, so dass Wasser und Stoffflüsse bilanziert werden, eine Frachtbezogene Ermittlung der Reinigungsleistung möglich ist und der Betrieb im Hinblick auf die Wasserqualitätsanforderungen des Bewässerungswassers optimiert werden kann. Ein weiterer Messpunkt für den Durchfluss (MID, IFM SM8000) befindet sich im Zulauf zum Bewässerungssystem auf dem Dach. Damit können die Bewässerungsgaben zeitlich aufgelöst und quantifiziert werden.

Die Erfassung von spezifischen Zuflussmengen zu den einzelnen Forschungsfeldern erfolgt nicht separat. Die entsprechenden Bewässerungsmengen lassen sich anhand der Zeitsteuerung mit Durchflussmengen des Dachzulaufs in Verbindung bringen.



Abbildung 2.3-2: Durchflussmesser am Dachzulauf.

### 2.3.2. Bodenfeuchte und Bewässerung

Für jedes der 21 Forschungsfelder ist ein eigener ventilgesteuerter Bewässerungsanschluss im System eingerichtet. Die Felder werden dabei über Tropfschläuche mit Wasser versorgt. Geplant war die Bewässerung über eine Bodenfeuchte-Steuerung im Substrat. Als Signalgeber sind dazu Coaxial Impedance Dielectric Reflectometry Frequency-Domain-Reflectometry (CIDR) Sensoren des Bautyps Stevens HydraProbe Professional, in jedes Forschungsfeld (außer FII.1) eingebaut. Bei dem Erreichen bestimmter Grenzwerte der Bodenfeuchte in Abhängigkeit von den drei oben beschriebenen Feuchteregimen soll Wasser auf die Flächen gegeben werden.

In der ersten Vegetationsperiode im Jahr 2020 waren die Bodenfeuchtesensoren noch nicht vollständig installiert bzw. erfolgte ihre Integration in das Messsystem während

dieser Periode. Nach Einbau wiesen die Sensoren erhebliche Messungenauigkeiten auf, sodass eine bodenfeuchtegesteuerte Bewässerung nicht möglich war. Ursächlich für die Messungenauigkeiten waren einerseits Störungen der elektromagnetischen Verträglichkeit der FDR Sensoren, andererseits ist das heterogene Dachsubstrat ein herausforderndes Messmedium. Der hohe Anteil mineralischer Schotterkörner (Ziegelsplitt, Blähton, Blähschiefer) nimmt Wasser langsamer auf als der Feinkornanteil und bildet in den Kontaktzonen von Einzelkörnern größere Hohlräume. Bei einem überproportionalen Anteil des groben Substrats im Messvolumen der Sensoren kann es zu einer systematischen Unterschätzung der Bodenfeuchte oder zu nicht-repräsentativen Messungen kommen. Um die Messbedingungen zu vereinheitlichen, wurden die Sensoren im Frühjahr 2021 in ein gesiebtes Substrat eingebaut, das eine maximale Korngröße von 10 mm aufweist (Kapitel 2.1 Lage und Einrichtung des Versuchsdaches). Literaturstudien und Beratungen mit weiteren Experten sowohl zu Gründach-Aufbauten als auch für Messtechnik insbesondere Feuchtesensoren haben zum Ergebnis gehabt, dass insbesondere in Dachsubstraten die Feuchtemessung äußerst anspruchsvoll ist. Die notwendige Messtechnik der Feuchtesensoren scheint nicht ausreichend in Bezug auf deren Einsatzfähigkeit in unterschiedlichen Substraten für Dachaufbauten untersucht. Hier sieht das Forschungsteam Handlungsbedarf und schlägt eine weitergehende Untersuchung von potentiell geeigneten Feuchtesensoren in unterschiedlichen Dachsubstraten vor.

Eine Bewässerung der Felder mit der installierten Tröpfchenbewässerung erfolgte im Rahmen der Fertigstellung der Pflanzung über die Vegetationsperiode 2020 hinweg manuell, jedoch ohne die Etablierung von bestimmten Feuchte-Regimen in den Forschungsfeldern. Vielmehr wurden über die Tropfer nach einem Bewässerungsschema für die Fertigstellungspflege die Pflanzungen mit Wasser versorgt. Dabei konnten erste Erkenntnisse zum Wasserverbrauch und der Wasserhaltekapazität der Felder gesammelt werden. Einschränkung haben sich hier jedoch durch pandemiebedingte Änderungen in den Arbeitsabläufen im Botanischen Garten, unter anderem einhergehend mit einem Duschverbot, ergeben.

In der Vegetationsperiode 2021 konnten grundlegend die geplanten drei Feuchteregime in den Feldern etabliert werden. Bedingt durch unzuverlässige Wertegaben der HydraProbes in den Feldern, wurden die Feuchtigkeitsregime mittels zeitlicher Steuerung nach den in Kapitel 5.1.2 Bewässerung beschriebenen Bewässerungsmengen differenziert.

### 2.3.3. Auslauf

Als weitere Komponente der Wasserbilanz werden die Auslaufmengen der 21 Forschungsfelder ermittelt. Überschüssiges Wasser, welches nicht in der Dachbegrünung bzw. den Referenzfeldern gehalten werden kann, läuft über die geschlitzte Wandung der Wannen in die Dachrinne. Die Dachrinne ist jeweils an den Strecken, an denen die Ränder der Wannen auf die Dachkante treffen mit Kunststofftrennwänden segmentiert. Jedes der Segmente verfügt über einen eigenen Ablauf, welcher in einem Ablaufbehälter mündet (Abbildung 2.3-3). In den Ablaufbehältern erfassen Drucksonden, UIT CTD-Sensor, die Wasserspiegelschwankungen. Der Abfluss aus den Behältern erfolgt durch einen schlitzförmigen Auslass, sodass keine manuelle Entleerung erforderlich ist. Über eine Wasserstand-Durchfluss-Beziehung werden aus den druckbasierten Wasserständen die Durchflussmengen berechnet.



Abbildung 2.3-3: Sammelbehälter mit Messung von geschlitztem Auslass.

### 2.3.4. Temperatur und Wärmefluss

Im und über dem Dachsubstrat werden Temperatur und Wärmefluss aufgezeichnet. Die CIDR-Sensoren in den Forschungsfeldern zeichnen neben der Bodenfeuchte die Temperaturen im Substratkörper in ihrer Einbautiefe von ca. 10 cm auf. Ergänzend sind in sechs Messfeldern Temperaturlanzen installiert (UIT Temperaturlanze, 30 cm). Sie zeichnen über zehn vertikale Messpunkte die Schichtung der Temperaturen im gesamten Substratkörper und in der Grenzschicht über der Substratoberfläche auf. Für bauklimatische Untersuchungen sind Wärmeflussplatten (Hukseflux HFP01) an relevanten Grenzflächen im Dachsubstrat sowie am Übergang der Dachbegrünung zum Massivdach eingebaut.

### 2.3.5. Verdunstung/Lysimeter

Um die Verdunstung bzw. Zu- und Abläufe einzelner Felder zu ermitteln, sind drei der Forschungsfelder mit Lysimeter ausgestattet. Jeweils vier Wägezellen (Bosche B10N) pro Messfeld erfassen die Massenveränderungen. Der Abfluss wird redundant zu den Auslaufbehältern mit Kippwaagen (SEBA Kippzähler RG50) ermittelt.

Die Massenerfassung wies bis Juli 2022 erhebliche Messartefakte auf, die durch eine ungenügende Entlastung von Querkräften bei thermischer Ausdehnung durch solare Einstrahlung der Messwannen verursacht wurden. Ein Umbau der Lysimeter im Juli 2022 mit einer verbesserten statischen Lagerung und Einhausung als Strahlungsschutz der Messparzellen konnte dieses Problem weitgehend beheben.

In Abbildung 2.3-4 ist vergleichend der Gewichtsverlauf für Forschungsfeld FI.1 vom 27.07. bis 03.08. im Jahr 2021 und 2022 dargestellt. Mit den roten Pfeilen markiert sind die Bewässerungsgaben 6 Uhr morgens, die 2021 beim Bewässerungsregime „maximal“ alle zwei Tage und 2022 täglich erfolgten (Kapitel 5.1.2 Bewässerung). Im Jahr 2021 fällt auf, dass das Gewicht des Forschungsfeldes tagsüber stark abfällt und am Abend wieder

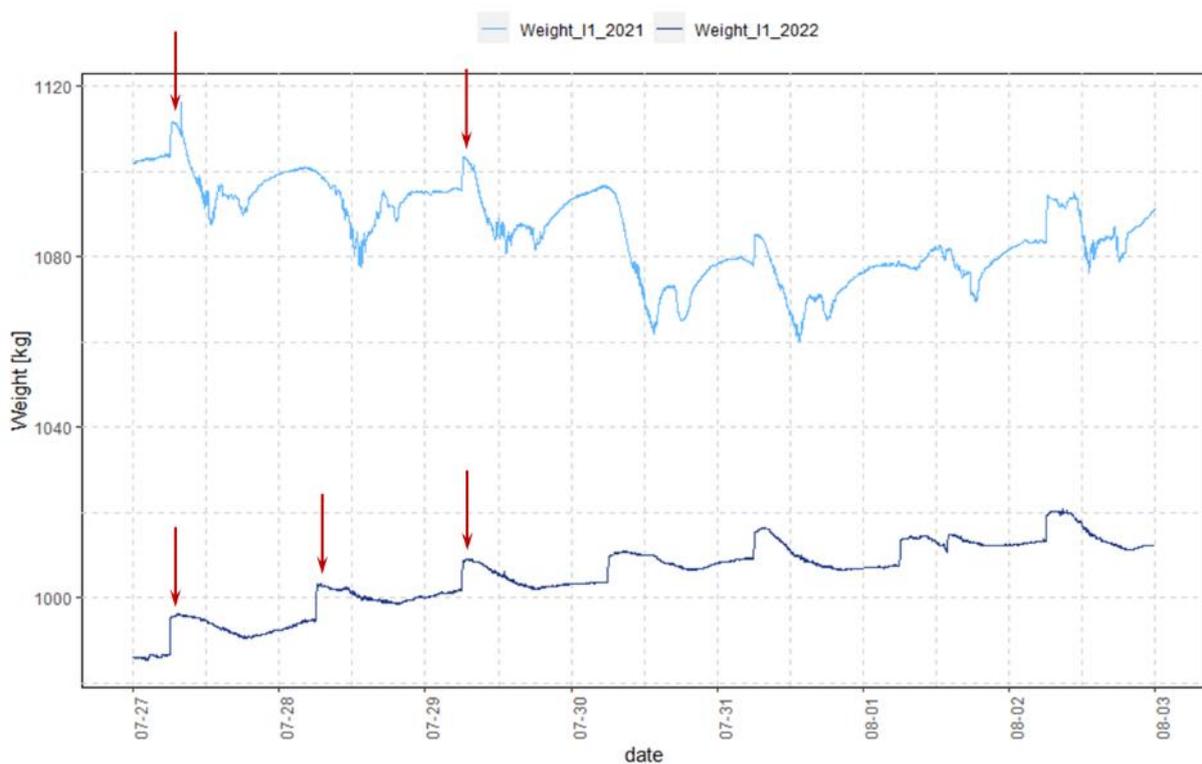


Abbildung 2.3-4: Vergleich der Gewichtsmessung des Lysimeter FI.1 vor dem Umbau (2021) und danach (2022).

ansteigt. Dieser Abfall und Wiederanstieg ist nicht logisch erklärbar und wurde durch die fehlerhafte Installation der Lysimeter verursacht. Nach dem Umbau funktioniert die Gewichtsmessung zuverlässig und die täglichen Artefakte treten stark vermindert auf. Der Umbau der Lysimeter wurde mit Eigenmitteln finanziert.

### 2.3.6. Wetterstation und Infrarotsensor

Für die Untersuchung der klimatischen Auswirkungen des Forschungsdaches auf seine Umgebung ist eine Wetterstation in ca. 4 m Entfernung östlich vom Gründache installiert. Sie erfasst Niederschlag (Young 5502), Strahlungsbilanz (Hukseflux NR01), Lufttemperatur und Luftfeuchte (GallTEC KPC 1/6-ME), Luftdruck (Sensortech LD) Windrichtung und Windgeschwindigkeit (Thiess compact). Ergänzend ist für die Untersuchung die Installation eines Infrarotsensors (InfraTec VarioCAM HDx) erfolgt. Die Installation fand bedingt durch notwendige Klärung von Fragen bezüglich des Denkmalschutzes und der Datensicherheit erst im August 2021 statt. Der Sensor konnte aufgrund von netzwerk-administrativen Einschränkungen nicht in den Messrechner eingebunden werden. Seit August 2021 werden durch den Infrarotsensor durchgängig alle 10 min Daten aufgenommen, die alle zwei Monate manuell ausgelesen und in ASCII Grid Format konvertiert werden (Kapitel 7 Stadtklimatische Bewertung des Kühlpotenzials (Arbeitspaket 5)). Um an der Wetterstation zur besseren Vergleichbarkeit Strahlungswerte ähnlich dem Dach zu erzeugen, ist im Umfeld der Station ein Gründachaufbau auf Bodenniveau realisiert, der eine identische Artenzusammensetzung der Pflanzung sowie gleiche Aufbauhöhen wie die Flächen auf dem Dach aufweist.

### 2.3.7. Bewässerungssystem

Die Bewässerung erfolgt über eine Druckpumpe, die das Wasser auf das Dach transportiert. Dort sind für jedes der 21 Messfelder steuerbare Magnetventile eingebaut. Fällt durch Öffnung der Ventile der Druck im Verteilsystem, fördert die Pumpe Wasser nach. Das Wasser wird mit Tröpfchenbewässerungsschläuchen auf den Messfeldern verteilt, dabei beträgt der durchschnittliche Abstand zwischen den Tropfauslässen 30 cm. Die Bewässerungsgaben wurde nach Testläufen in der Periode der Fertigstellungspflege in Rhythmus und Menge angepasst. Tabelle 2-9 beschreibt die Bewässerungsregime. In Kapitel 5.1.2 Bewässerung wird ausführlicher auf die Anpassungen eingegangen. Die Zulaufmengen werden über die in Kapitel 2.3.1 Wasserversorgung beschriebene Durchflussmessung erfasst. Eine Zuordnung der Wassermengen zu den einzelnen Messfeldern erfolgt über eine zeitlich gestaffelte Bewässerung.

Tabelle 2-9: Spezifikationen der unterschiedlichen Bewässerungsregime.

| Strategie | Bewässerungsrhythmus | Bewässerungsmenge |                         |
|-----------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| Maximal   | 1-tägig              | 8,5 L             | 2,4 L/m <sup>2</sup> /d |
| Medial    | 2-tägig              |                   | 1,2 L/m <sup>2</sup> /d |
| Minimal   | 4-tägig              |                   | 0,6 L/m <sup>2</sup> /d |

## 3. Öffentlichkeitsarbeit (Arbeitspaket 1)

### 3.1. Koordination/Austausch

Für das interdisziplinäre Projekt erfolgt ein engmaschiger Austausch zur Durchführung und Auswertung der Messkampagnen, zum Datenaustausch Bonitur und Pflegegängen. Zu diesem Zweck werden durch die Projektleitung Jour Fixe-Termine in 14-tägigem Rhythmus durchgeführt und per Kurzprotokoll dokumentiert. Beispielsweise erfolgte eine Abstimmung zu Datenhaltungsoptionen, die über die beteiligten Professuren hinweg Zugriff auf die gewonnenen Daten ermöglicht. Messwerte des Messsystems werden seit 2021 täglich vom Messrechner auf einen Datenbankserver der TU Dresden transferiert. Diese Daten stehen dann allen Beteiligten per Online-Tool ‚grafana‘ zur Einsicht und professurspezifischen Auswertung zur Verfügung. Die in der Bonitur gewonnenen Daten werden ebenso in eine Datenbank übersetzt und für statistische Auswertungen in verschiedenen Formaten zur Verfügung gestellt.

Im Zusammenhang mit der Datenerfassung, -bereinigung und -auswertung steht auch die Wartung. Hierzu ist im Zusammenhang mit dem Teilarbeitspaket der Wartung der Wartungsplan im Anhang (10.3 Wartungsplan des Gründachs) beigefügt, welcher die Aufgaben und Zuständigkeiten zeigt.

### 3.2. Öffentlichkeitsarbeit

Neben der Koordination von Arbeitsabläufen ist auch die Öffentlichkeitsarbeit und damit die außenwirksame Vermittlung der Arbeitsinhalte im Zusammenhang mit bewässerten Gründächern Bestandteil des Arbeitspakets 1.

Dabei ist zum einen die Kommunikation auf wissenschaftlicher Ebene, zum anderen aber auch die Ebene der Umweltbildung und Lehre zu betrachten. Für die allgemeine Information sowohl für Wissenschaft als auch für die Lehre und interessierte Öffentlichkeit wurde eine Webseite eingerichtet, auf der Informationen zum Projekt zu finden sind (<https://tu-dresden.de/bu/architektur/ila/labau/forschung/laufende-forschungsprojekte/modellprojekt-integrales-wassermanagement>).

#### 3.2.1. Wissenschaftliche Ebene

Das Projekt wurde im Zusammenhang mit dem Messsystem auf der novatech-Konferenz 2019 in Lyon durch die Professur für Siedlungswasserwirtschaft vorgestellt. Auf dem durch die GRAIE (group of research, technical coordination and water information) organisierten Kongress für Siedlungswasserwirtschaft wurde bei der Posterpräsentation im Wesentlichen die Konzipierung des Messsystems vorgestellt.

Das Projekt wurde weiterhin im November 2020 im Rahmen des NEXUS-Seminars der UNU-FLORES Akademie in einem Vortrag durch Frau Prof. Lohaus einem internationalen Publikum präsentiert.

Um das Projekt in der Fachwelt zur Diskussion zu stellen, wurde es auf dem Weltkongress Gebäudegrün, veranstaltet durch den Bundesverband GebäudeGrün e.V., am 21. März 2020 (Poster) und am 24. November 2021 auf dem Bundeskongress Gebäudegrün präsentiert (Poster und Vortrag).

Darüber hinaus ist das Projekt mit der TU Dresden als Forschungsstandort in einem Beitrag zur Dachbegrünungsforschung in der Ausgabe 03/2021 der Fachzeitschrift GebäudeGrün erschienen.

Am 10. Mai 2022 wurde das Projekt beim BuGG-Tag der Forschung und Lehre (Bundesverband GebäudeGrün e.V.) vorgestellt.

Während des Hochschulinformationstags der TU Dresden am 10. Februar 2022 wurde das Projekt in Form eines Posters am Stand der Fakultät präsentiert.

Im Rahmen der Umweltbildung fand die Aufnahme des Gründaches in sogenannte Gartenrundgänge des Botanischen Gartens statt. So wurde das Forschungsprojekt am 19. Juni 2022 der Öffentlichkeit vor Ort vorgestellt. Dieser Schritt war bereits zu Projektbeginn in Planung konnte pandemiebedingt aber zunächst umgesetzt werden. Die Gartenrundgänge bieten Besuchern des Botanischen Gartens die Möglichkeit sich zu bestimmten Themen des Gartens und seinen Forschungsfragen zu informieren und weiterzubilden.

Am 07. September 2022 wurde das Projekt durch das Forschungsteam im Botanischen Garten der Sächsischen Zeitung präsentiert. Im Ergebnis wurde in der Ausgabe vom 12. September ein vierspaltiger Artikel auf der Wissenschaftsseite der Sächsischen Zeitung (Abbildung 3.2-1) veröffentlicht. Mit anwesend waren Beschäftigte der Pressestelle der TU Dresden.

Zudem fand am 28. Juni 2023 ein von Frau Prof. Irene Lohaus geführter Rundgang über das Gründach im Rahmen der Dresdner Gartenspaziergänge statt, an dem 55 sehr interessierte Dresdener und Dresdnerinnen teilnahmen (Abbildung 3.2-2).

# Obenrum wird's grün

In Dresden könnte die Pflicht zu Gründächern kommen. Was tun die fürs Stadtklima? Forscher sind schon dran an der Frage.

VON JANA MUKDUS

Die Zahl ist übersichtlich. Für eine Stadt wie Dresden wirkt sie geradezu mickrig. Lediglich 1.358 Gründächer existieren derzeit in der Landeshauptstadt. Das entspricht nicht einmal einem Prozent der 140.000 Dächer, die es hier gibt. Nach Plänen der bisherigen Umweltbürgermeisterin Eva Jähnigen und Baubürgermeister Stephan Kuhn (beide Grüne) soll Dresden eine neue Begrünungsatzung bekommen. Diese schreibt für neu geplante Mehrfamilienhäuser oder auch Industriebauten Gründächer vor. Ob der Stadtrat dem zustimmt, entscheidet sich bis Jahresende. Falls die Politiker eine Entscheidungshilfe brauchen, lohnt sich ein Spaziergang in den Botanischen Garten der TU Dresden – besser gesagt, zum Verwaltungsgebäude der Anlage. Dort läuft ein besonderes Forschungsprojekt, an dem gleich mehrere Fachbereiche beteiligt sind. Die Frage lautet: Wie wirken Gründächer und kann man sie eventuell mit Dusch-Wasser bewässern?

Hoch ist das Dach nicht. Das obere Ende des flachen Anbaus an das Verwaltungsgebäude ist von der angrenzenden Straßenseite gut zu erkennen. Das hat durchaus Vorteile. „Wenn Leute hier vorbeilaufen, schauen sie, was wir hier machen“, schildert Irene Lohaus, Inhaberin der Professur für Landschaftsbau. „Das Interesse für das Thema ist gewachsen.“ Mit Kollegen der Professur für Siedlungswasserwirtschaft, der Professur für Meteorologie und des Instituts für Bauklimatik lässt sie es auf dem Flachdach grünen.

Die Idee dazu entstand bereits vor gut sechs Jahren. Ende 2018 bewilligte die Deutsche Forschungsgemeinschaft dann Gelder für das Vorhaben. Unterstützung kommt außerdem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Nach Abschluss der Planungen begannen im Jahr 2020 die Vorbereitungen. Über 200 Sensoren verbaute die Forscher auf dem Dach, verlegten Leitungen für die Bewässerungen und teilten die Dachfläche in insgesamt 21 Messfelder auf. Einige davon liegen tagsüber im Schatten, andere in der vollen Sonne.

Es geht nicht unbedingt darum, die besten Pflanzen für eine Dachbegrünung zu finden, machen die Wissenschaftler deutlich. Es geht vielmehr um die Frage, ob und wie solche Dächer mit Wasser versorgt werden können. Wie viel davon nehmen die Pflanzen und die speziellen Substrate, in denen sie wachsen, auf? Wie hoch ist die Verdunstung, die gleichzeitig einen kühlenden Effekt auf die Umgebung hat? Eine Besonderheit des Projekts ist deshalb die Wissenschaftler verwenden anfallendes Grauwasser aus dem Verwaltungsgebäude für die Bewässerung, also Wasser aus Waschbecken oder Duschen. Auch das Wasser aus dem Rührspülbecken oder der Spül- und Waschmaschine wäre nutzbar, erklärt Björn Helm, Mikarbeiter an der Professur



Sieht aus wie ein Kleingarten, ist aber ein Dach. Irene Lohaus, Björn Helm und Richard Walter erforschen auf dem Dach des Botanischen Gartens in Dresden, wie Gründächer das Stadtklima beeinflussen können. Foto: Nina Weichert/PHO

für Siedlungswasserwirtschaft. „Das nutzen wir hier aber nicht.“

Eine extra angelegte Pflanzen-Klimakammer stößt ein paar Meter vom Dach entfernt dafür, dass aus Grauwasser auf natürliche Weise gereinigt wird. Einige Messfelder auf dem Dach werden damit bewässert, andere nicht. Gerade in diesem Sommer zeigten sich deutliche Unterschiede. „Wir hatten 2022 insgesamt 17 Hitzetage mit Temperaturen über 30 Grad Celsius“, beschreibt Valeri Goldberg von der Professur für Meteorologie. 2021 waren es nur vier Tage. Zudem hat es viel zu wenig geregnet. In den trockenen Wochen litten die unbewässerten Areale auf dem Dach deutlich. Vertrocknete Pflanzenreste sind auch jetzt noch zu sehen. Die Stellen mit Wasserversorgung wachsen dagegen üppig und dicht. Mehrfach haben die Wissenschaftler mit Drohnenaufnahmen den Beweis in Bil-

dern festgehalten, die Wuchshöhe ermisst und die Blüten gezählt. Doch das ist längst nicht alles.

Ein Thermalsensor schaut von einer Fensterbank des Verwaltungsgebäudes von oben auf das Dach. Er zeigt in farbigen Aufnahmen, wie genau es dort wie warm wird. In einem Bild vom 8. August 2022 sind die bewässerten Flächen 25 Grad Celsius warm, die unbewässerten, wenig bewachsenen ganze 50 Grad Celsius und teil noch heißer.

„Das ist ein Problem, denn diese Wärme geht ins Gebäude“, erklärt Peggy Freudenberg vom Institut für Bauklimatik. Im Haus wird es dadurch nicht nur warm, auch für die Dachkonstruktion ist das schwierig. „In ein Flachdach zehn Jahre lang hohen Temperaturunterschieden von bis zu 30 Grad Celsius im Sommer und im-

Winter zehn Grad Celsius im Winter ausgesetzt, ist das schädlich für die Baustoffe.“ Die Wissenschaftlerin schaut sich deshalb auch an, wie Substrate beschaffen sein müssen und welche Pflanzen verwendet werden sollten, die möglichst viel Verdunstung und damit einen kühlenden Effekt erzielen.

Die feinen Sensoren messen auch, wie viel Wasser auf dem Dach gespeichert wird. Gerade bei Starkregen ist das ein Thema, erklärt Björn Helm. Wie muss ein Gründach beschaffen sein, das möglichst als Regenpuffer dienen kann? Eine wichtige Rolle dabei spielt das verwendete Pflanzsubstrat, eine Mischung aus verschiedenen Komponenten wie Blähton, Ziegelsplitt oder Rindenhumus. Die Forscher experimentieren deshalb auch mit verschiedenen Schichtstärken.

In den kommenden Monaten werden die seit Anfang 2021 erhobenen Daten ausgewertet. Am Ende zeigen die Auswertungen, wie Gründächer das Stadtklima beeinflussen können. „Wir wollen auch eine Antwort darauf finden, welche Wasserrechner wir für ein Gründach brauchen“, erläutert Irene Lohaus. Eine normale Zisterne für Regenwasser müsste für 100 Tage Trockenzeit für ein 100 Quadratmeter großes Haus 25 Kubikmeter groß sein. Ein Umstieg „Grauwasser fließt ständig nach, die Zisterne wäre hier nur vier- bis fünf Kubikmeter groß.“

Die Forscher hoffen, dass sie eine Anschlussfinanzierung für ihr Projekt bewilligt bekommen. „Wir wollen dann unter anderem gern ergründen, ob Grauwasser eventuell auch ungeklärt für die Dachbewässerung einsetzbar wäre“, fügt die Professorin hinzu. Klappert es, würde das Gründächer noch attraktiver machen.



Valeri Goldberg und Peggy Freudenberg an der meteorologischen Messstation. Die steht gleich neben dem Gründach. Foto: Michael Weichert/PHO



Je röter, desto heißer: Der Thermalsensor zeigt die heißen Flächen auf dem Gründach. Foto: TU Dresden

Abbildung 3.2-1: Artikel der Sächsischen Zeitung über das Forschungsprojekt „Modellprojekt Integrales Wassermanagement“.



Abbildung 3.2-2: Dresdner Gartenspaziergang am 28.06.23.

### 3.2.2. Umweltbildung und Lehre

Im Bereich der Einbindung des Projektes in die Lehre und Umweltbildung sind verschiedene Aktivitäten anzuführen, die der Wissensvermittlung rund um bewässerte Gründächer dienen.

Bereits beim Aufbau der Dachbegrünung wurde der Bildungsauftrag wahrgenommen, da Studierende unterschiedlicher Jahrgänge der Studiengänge Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftsarchitektur bei den Baumaßnahmen des Daches sowie der Pflanzung beteiligt wurden und auf diese Weise einen praxisnahen Einblick in die Konstruktion von Gründächern erhielten.

Das Forschungsdach ist außerdem seit Herbst 2020 fester Bestandteil der Exkursionsangebote im Bachelorstudium Landschaftsarchitektur. Im Lehrbaustein Dachbegrünung wurden den Studierenden zum einen die Dachaufbauten erläutert sowie im speziellen die Fragestellungen, die im Projekt beantwortet werden sollen, vorgestellt.

Verschiedene studentische Arbeiten hatten das Forschungsgründach sowie die Auswertung der ermittelten Messdaten zum Gegenstand. Dazu zählen sowohl Projektarbeiten als auch Abschlussarbeiten. Diese sind:

- Hendrich, Juliane; Vahlpahl, Hans: Untersuchung der Wasserbilanz eines bewässerten Gründachs im Botanischen Garten Dresden, Studienprojekt, Master-Studiengang Wasserwirtschaft, Laufzeit: 01.06.2020 – 31.05.2021, Professur Siedlungswasserwirtschaft.
- Thomas, Adrian: Untersuchung des Wasserhaushalts einer bewässerten Dachbegrünung im Botanischen Garten Dresden, Bachelorarbeit, Bachelor-Studiengang Hydrowissenschaften, Laufzeit: 22.06.2020 – 14.09.2020, Professur Siedlungswasserwirtschaft.
- Zeeh, Johanna: Untersuchung der Wasserqualität einer mit Grauwasser bewässerten Dachbegrünung mit Online-Sensoren, Bachelorarbeit, Bachelor-Studiengang Hydrowissenschaften, Laufzeit: 08.07.2020 – 21.10.2020, Professur Siedlungswasserwirtschaft.
- Lee, Hayan: Thermal response and implications on water balance of differently vegetated semi-intensive green roofs, Masterarbeit, Master-Studiengang Hydro Science and Engineering, Laufzeit: 01.11.2020 – 26.04.21, Professur Siedlungswasserwirtschaft.
- Volks, Paula: Das Mikroklima des Botanischen Gartens in Dresden. Naturressourcenprojekt, Masterstudiengang Raumentwicklung und Naturressourcenmanagement, Fakultät Umweltwissenschaften der TU Dresden, Oktober 2020 - Mai 2021.
- Honorato, André: Implementation and performance evaluation of a reactive transport model for greywater treatment in vertical flow constructed wetlands, Masterarbeit, Studiengang Hydro Science and Engineering, Professur Siedlungswasserwirtschaft, Oktober 2020 – März 2021.
- Noack, Marie-Luise: Thermische Emissivität und Oberflächentemperatur des Gründachs im Botanischen Garten von Dresden. Bachelor-Arbeit Studiengang Hydrowissenschaften, Professur für Meteorologie der TU Dresden, Januar - Juni 2021.
- Harrison, Wayne; Muhammad, Kashif; Ali Shah, Syed Sheraz: Determination of Hydraulic Properties of a Constructed wetland under different Loading Regimes using Tracer Experiments, Study Project, Master-Studiengang Hydro Science and Engineering, Professur Siedlungswasserwirtschaft Laufzeit: 01.04.2021 – 01.11.2021.
- Görz, Paula; Martin, Gwendolin; Woltmann, Rhea: Untersuchung zu den Auswirkungen verschiedener Bewässerungsstrategien auf den Wasserhaushalt eines Gründachs im Botanischen Garten Dresden, Studienprojekt, Master-Studiengang Wasserwirtschaft, Laufzeit: 01.05.2021 – 30.04. 2022, Professur Siedlungswasserwirtschaft.

- Steiner, Willi: Entwicklung eines Verfahrens zur automatisierten Quantifizierung von Dachgrün mittels multi-spektraler Daten, Master-Thesis, Juniorprofessur für Geosensorsysteme, Laufzeit: 01.08.2021 – 27.04.2022.
- Sneath, Sarah, Kalule Leonald, Ried, Vincent: Heat flow balance of a green roof. Study Project, Master-Studiengang Hydro Science and Engineering, Professur für Meteorologie, Oktober 2021- April 2022.
- Sikka, Ritesh: Simulation of green roof performance with rainfall-runoff models: parameter selection and model complexity, Masterarbeit, Master-Studiengang Hydro Science and Engineering, Laufzeit: 02.05.2022 – 26.09.2022, Professur Siedlungswasserwirtschaft.
- Röhr, Lina Bianka; Sevenich, Jonas: Bestimmung von hydrologischen Kennwerten und Wasserhaushaltsgrößen bewässerter Dachbegrünungen am Beispiel des Forschungsgründachs im Botanischen Garten Dresden, Studienprojekt, Master-Studiengang Wasserwirtschaft, Laufzeit: 16.05.2022 – 15.05.2023, Professur Siedlungswasserwirtschaft.
- Williams, David Onyensi: Thermal and evaporative response of differently vegetated, irrigated, semi-intensive green roofs, Masterarbeit, Master-Studiengang Hydro Science and Engineering, Laufzeit: 01.06.2022 – 26.10.2022, Professur Siedlungswasserwirtschaft.
- Donau, Jessica: Kosten und Nutzen von Gründächern, Forschungsprojekt Gründach, Projekt wissenschaftliches Arbeiten, Fakultät Architektur der TU Dresden, 11.07.2022.
- Kronstein, Clara und Liesch, Magdalena: Bewässerung von Gründächern, Forschungsprojekt Gründach, Projekt wissenschaftliches Arbeiten, Fakultät Architektur der TU Dresden, 11.07.2022.
- Bartels, Lea und Beckmann, Helen: Gründach-Konstruktionsvarianten, Gründach, Projekt wissenschaftliches Arbeiten, Fakultät Architektur der TU Dresden, 11.07.2022.
- Hänicke, Philipp: Bauphysikalische Messdatenanalyse für Gründach-Testfelder auf dem Gelände des Botanischen Gartens in Dresden, Diplomarbeit, Fakultät Architektur der TU Dresden, 03.08.2022.
- Volks, Paula: Wirkung von unterschiedlicher Dachbegrünung auf das urbane Mikroklima und die Wärmebelastung, Masterarbeit, Masterstudiengang Raumentwicklung und Naturressourcenmanagement, Laufzeit 26.04.-31.10.2022, Professur Meteorologie, TU-Dresden.

## 4. Vitalität und Ästhetik (Arbeitspaket 2)

Im folgenden Kapitel werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Bewässerungsregime mit vorgereinigtem Grauwasser auf die Vitalität und Ästhetik der Pflanzen in den Forschungsfeldern behandelt. Hierfür wurden in zweiwöchigen Bonituren diverse Parameter der Bepflanzung aufgenommen (Tabelle 4-1). Ziel dabei war es, die einzusetzende Grauwassermenge den Entwicklungsreaktionen der Pflanzen gegenüberzustellen, um abzuwägen, welche Mengen für eine vitale und ästhetisch funktionale Pflanzung erforderlich sind (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Untersuchungsparameter der Bonituren und zugehörige Auswertungsebene.

| Parameter  | Auswertungsebene  | Auswertung<br>Vitalität Ästhetik |
|--|---|----------------------------------|
| <b>Gesamteindruck</b>  | Vitalität, Ästhetik   | vollständig ausgewertet          |
| <b>Deckungsgrad – optische Einschätzung</b>                  | Vitalität, Pflegeintensität, Transpirationsleistung, Retentionsvermögen | vollständig ausgewertet          |
| <b>Deckungsgrad – fotografische Auswertung</b>               | Vitalität, Pflegeintensität, Transpirationsleistung, Retentionsvermögen | vollständig ausgewertet          |
| <b>Höhenentwicklung</b>                                      | Vitalität, Ästhetik   | vollständig ausgewertet          |
| <b>Blühverhalten</b>   | Vitalität, Ästhetik   | vollständig ausgewertet          |
| <b>Blattanzahl</b>   | Vitalität, Transpirationsleistung, Retentionsvermögen                   | vollständig ausgewertet          |
| <b>Blattgröße</b>  | Vitalität, Transpirationsleistung, Retentionsvermögen                   | vollständig ausgewertet          |
| <b>Blattgesundheit</b>                                       | Vitalität, Transpirationsleistung, Retentionsvermögen, Ästhetik         | vollständig ausgewertet          |
| <b>Arteneintrag</b>  | Pflegeintensität  | vollständig ausgewertet          |
| <b>Anzahl ausgefallener Individuen</b>                       | Vitalität, Pflegeintensität, Transpirationsleistung, Retentionsvermögen | nicht auswertbar                 |
| <b>Widerstandsfähigkeit gegen Krankheiten und Schädlinge</b> | Vitalität, Ästhetik   | nicht auswertbar                 |
| <b>Frostbeständigkeit</b>                                    | Vitalität   | nicht auswertbar                 |
| <b>Vegetative Phänostufen</b>                                | Vitalität, Transpirationsleistung, Retentionsvermögen, Ästhetik         | nicht auswertbar                 |
| <b>Generative Phänostufen</b>                                | Vitalität, Transpirationsleistung, Retentionsvermögen, Ästhetik         | nicht auswertbar                 |

Einige der in den Bonituren untersuchten Parameter erwiesen sich als nur bedingt auswertbar. Problematisch waren die Parameter „Anzahl ausgefallener Individuen“, „Widerstandsfähigkeit gegen Krankheiten und Schädlinge“, „Frostbeständigkeit“ sowie „Vegetative/Generative Phänostufen“. So schwankt die Anzahl ausgefallener Individuen in den Wertungen, was auf Fehler in der Bonitur zurückzuführen ist. Dies liegt u. A. daran, dass einzelne Individuen im Projektverlauf im Standort leicht „gewandert“ sind (Ausbreitung über Wurzelschösser, Aussaat etc.) und in Folge die Zuordnung zum Pflanzplan durch den Boniteur wiederholt fehlerhaft eingeschätzt wurde. Die „Widerstandsfähigkeit gegen Krankheiten und Schädlinge“ war in der Aufnahme nicht konsistent zu bewerten, da die auftretenden Schad- und Krankheitsbilder durch den Boniteur nicht eindeutig zu unterscheiden waren. Bei der Betrachtung der

„Frostbeständigkeit“ wurden keine auswertbaren Auffälligkeiten aufgenommen. Die zu untersuchenden Phänostufen ließen sich in den Bonituren nicht eindeutig zuordnen und brachten keine auswertbaren Ergebnisse.

#### 4.1. Methodik

Die erhobenen und digitalisierten Boniturdaten werden für die jeweiligen Zeiträume zum Boniturgang ermittelt. Die Auswertung erfolgt über Microsoft Excel mittels deskriptiver und inferenzstatistischer Verfahren. Anhand der im nachfolgenden Kapitel dargestellten Hypothesen werden verschiedene Auswertungsbefehle erstellt, über die Boniturdatenbank abgefragt und die Ergebnisse bewertet.

Bestimmte Zusammenhänge stehen bei der Auswertung im Fokus. So zum Beispiel der Zusammenhang zwischen Bewässerungsgabe und Vitalität. Hierbei werden die Bewässerungsgabe und die Bodenfeuchte als Werte aus dem Messsystem sowie der Deckungsgrad, die Höhen (minimale und maximale Höhe) und das Blühverhalten als Boniturdaten auf Korrelationen untersucht. Dabei werden jeweils die Forschungsfelder separat, die Regime an einem Standort sowie die Regime über das gesamte Dach auf signifikante Unterschiede hin untersucht.

Ob und wie eine Bewässerung die Pflege beeinflusst soll mit Hilfe der Betrachtung von Arteneinflug und Bewässerungsregime sowie -menge untersucht werden.

Aufschluss über die Beeinflussung von Bewässerung auf die Verdunstungsleistung der Dachbegrünung sollen die Auswertungen von Bewässerungsgabe, Bodenfeuchte und Verdunstungsleistung als Werte aus dem Messsystem bzw. rechnerisch ermittelter Werte und den Deckungsgraden geben. Auch hier werden jeweils die Forschungsfelder miteinander verglichen, die Ergebnisse in Bezug auf die Bewässerungsregime an einem Standort sowie die Regime über das gesamte Dach gegenübergestellt.

Wie sich die Entwicklung der Pflanzung auf das Retentionsvermögen auswirkt, sollen Korrelationsuntersuchungen der Werte Auslauf, Bodenfeuchte und Deckungsgrad zeigen. Hier werden neben der Analyse im Boniturrhythmus auch ereignisbezogene, also Daten zu bestimmten Regenereignissen, die ein Retentionspotential deutlich zeigen könnten, in die Bewertung einbezogen.

#### 4.2. Untersuchungszeitraum

Die Bonituren erfolgten im zweiwöchigen Turnus nach festem Terminplan (Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3). Die Benennung ergibt sich aus dem Kürzel für das Jahr und der chronologisch fortlaufenden Nummer der Bonitur (Bsp.: 6. Bonitur 2022 = 22-06).

2020 wurde das Gründach samt Pflanzung angelegt, sowie das Messsystem aufgebaut. Durch die Coronapandemie kam es hierbei zu erheblichen Verzögerungen.

Tabelle 4-2: Terminplan der Bonituren für 2021.

| Bonitur | Datum    | Kommentar              |
|---------|----------|------------------------|
| 21-01   | 23.03.21 | erster Austrieb        |
| 21-02   | 01.04.21 |                        |
| 21-03   | 19.04.21 |                        |
| 21-04   | 30.04.21 |                        |
| 21-05   | 21.05.21 |                        |
| 21-06   | 03.06.21 |                        |
| 21-07   | 15.06.21 | Nachpflanzung          |
| 21-08   | 23.06.21 |                        |
| 21-09   | 13.07.21 |                        |
| 21-10   | 23.07.21 |                        |
| 21-11   | 07.08.21 |                        |
| 21-12   | 18.08.21 |                        |
| 21-13   | 06.09.21 |                        |
| 21-14   | 17.09.21 |                        |
| 21-15   | 01.10.21 |                        |
| 21-16   | 16.10.21 | Einziehen der Pflanzen |
|         |          |                        |
|         |          |                        |

Tabelle 4-3: Terminplan der Bonituren für 2022.

| Bonitur | Datum    | Kommentar              |
|---------|----------|------------------------|
| 22-01   | 01.04.22 | erster Austrieb        |
| 22-02   | 15.04.22 |                        |
| 22-03   | 29.04.22 |                        |
| 22-04   | 13.05.22 |                        |
| 22-05   | 27.05.22 |                        |
| 22-06   | 10.06.22 |                        |
| 22-07   | 24.06.22 |                        |
| 22-08   | 08.07.22 |                        |
| 22-09   | 22.07.22 |                        |
| 22-10   | 05.08.22 |                        |
| 22-11   | 19.08.22 |                        |
| 22-12   | 02.09.22 | 12                     |
| 22-13   | 16.09.22 |                        |
| 22-14   | 30.09.22 |                        |
| 22-15   | 14.10.22 |                        |
| 22-16   | 28.10.22 |                        |
| 22-17   | 11.11.22 |                        |
| 22-18   | 25.11.22 | Einziehen der Pflanzen |

2020 wurde somit für die Inbetriebnahme und diverse erste Anpassungen am Messsystem und Testläufe in der Datenaufnahme genutzt. Auswertbare Datenreihen konnten nicht erhoben werden. Die geregelte Aufnahme startete 2021. Durch weitere Nacharbeiten am Messsystem kam es jedoch auch im Verlauf der 2. Vegetationsperiode 2021 immer wieder zu leichten mechanischen Beeinträchtigungen der Pflanzungen. So mussten bspw. zusätzliche Messungen und Umrüstarbeiten an den Bodenfeuchtesensoren durchgeführt oder Bewässerungsschläuche getauscht werden. Eine erste Aufnahme von Pflanzeigenschaften war ab dem 23. März 2021 möglich. Im Jahr 2021 wurden insgesamt 16 Bonituren durchgeführt. Diese wurden aufgrund der Entwicklungsphase der Stauden lediglich stichprobenartig untersucht. Die Vegetation erreichte erst gegen Ende der Vegetationsentwicklung einen voll entwickelten Zustand. Im Jahr 2022 wurden 18 Bonituren durchgeführt. Die Bonitur der dritten Vegetationsperiode startete zum 01. April 2022.

In der ersten Vegetationsperiode 2020 ist nur partiell der gewünschten Deckungsgrad durch die Staudenpflanzung in den Feldern erzielt worden. Auch kam es zu vereinzelt Ausfällen. Im Zusammenhang mit den gestellten Forschungsfragen wird vor allem der unbefriedigende Deckungsgrad als deutlich nachteilig in Bezug auf die Beantwortung insbesondere im Hinblick auf die Verdunstung und das Retentionsvermögen gesehen. Hintergrund ist unter anderem die unscharfe Abgrenzung zwischen Transpiration und

Evaporation in den Feldern. Um dem potentiellen Risiko einer erhöhten Bodenverdunstung und der nur bedingt möglichen rechnerischen Trennung im Vergleich zu einer 100%-Deckung mit Pflanzenmaterial entgegenzuwirken wurde 2021 nachgepflanzt, um den Bestand in den Forschungsfeldern zu verdichten und somit den Deckungsgrad und folglich die Transpirationsleistung zu steigern. Neben diesem Aspekt ist nach SALCHEGGER 2010 ein verringerter Deckungsgrad nachteilig für das Retentionsvermögen und dieser sollte daher für die folgenden Standjahre mit der Nachpflanzung erhöht werden. Da die Pflanzen auch in 2021 noch nicht voll entwickelt waren (Abbildung 4.2-1) wodurch die Unterschiede durch die verschiedenen Bewässerungsregime kaum zu Tage treten. Deshalb konzentrieren sich die Auswertung vor allem auf das Jahr 2022 mit der voll entwickelten Pflanzung.



*Bonitur 21-08, 23. Juni 2021.*



*Bonitur 22-07, 24. Juni 2022*

*Abbildung 4.2-1: Vergleich Feld FI.1 2021 und 2022.*

Das in 2021 neu bepflanzen Referenzfeld FIII.8 am Standort III zeigt über die gesamte Vegetationsperiode 2022 kaum Zuwachs. Dieses mag auf die einsetzende extreme Trockenheit ab dem 15.05.22 zurückzuführen sein, doch ist nicht auszuschließen, dass die Pflanzung aus der Fertigstellungspflege nicht hinreichend gestärkt hervorging, so dass die noch nicht voll entwickelte Pflanzung dem extremen Sommer nicht ausreichend standhalten konnte. Da die gewählten Arten darüber hinaus in der Regel eine Vegetationsperiode bis zur vollständigen Entwicklung benötigen, wurde dieses Feld in dieser Vegetationsperiode nicht als Referenz herangezogen.

### 4.3. Versuchsergebnisse

#### 4.3.1. Einfluss des Wasserdargebots auf Vitalität und Ästhetik

*Hypothese: Je kontinuierlicher das Wasserdargebot im Bereich der maximalen Feldkapazität gehalten wird, umso stärker kann die Vitalität und Ästhetik Einfacher Intensivdachbegrünungen im Vergleich zu den geringer bzw. nicht bewässerten Referenzfeldern verbessert werden.*

Zur Einschätzung werden die Parameter Gesamteindruck, Deckungsgrad (optische Einschätzung und graphische Auswertung), Höhenentwicklung, Blühverhalten, Blattanzahl, Blattgröße, Blattgesundheit und Volumen betrachtet.

Zur besseren Einordnung der Ergebnisse werden zusätzlich die Lufttemperaturen, sowie die Bodenfeuchte am Forschungsdach hinzugezogen.

##### 4.3.1.1 Gesamteindruck

Zu Beginn jeder Bonitur wird das Erscheinungsbild jedes Feldes im Querblick bewertet. Diese Bewertung des Gesamteindrucks wird zur Einschätzung der ästhetischen Erscheinung der Pflanzung herangezogen.

In Abbildung 4.3-1 sind die Mittelwerte des Gesamteindrucks aller Forschungsfelder nach Bewässerungsregimen in 2022 dargestellt. Zu Beginn und zum Ende der Vegetationsperiode nehmen die Wertungen aller Regime gemeinsam zu/ab, was auf die jahreszeitliche Entwicklung in Frühjahr und Herbst zurückzuführen ist.

Die Felder, welche mit dem maximalen Bewässerungsregime bewirtschaftet werden, wurden bis auf eine Ausnahme in Bonitur 22-17 (11. November 2022) durchgängig als die mit dem besten Gesamterscheinungsbild bewertet. Sie erreichen in der Hauptvegetationsphase durchgängig die höchste Wertung „ausgezeichnet“ (Tabelle 4-4) Es ist auffällig, dass die Wertung relativ konstant positiv ist und auch durch die Hitzeperioden im Sommer 2022 kaum beeinflusst werden.

Die medial bewässerten Felder werden durchgehend leicht niedriger eingeschätzt und bewegen sich in der Wertung „sehr gut“ bis „gut“. Die besonders hohen Temperaturen von Juni bis August lassen sich an leicht einbrechenden Wertungen in den Bonituren 22-06 (10. Juni 2023), 22-09 (22. Juli 2022) und 22-11 (19. August 2022) ablesen. Hier spiegelt sich das niedrigere Wasserdargebot in der Erscheinung der Pflanzen wieder. Mit sinkenden Temperaturen ab Bonitur 22-12 (02. September 2022) Ende August (keine Hitzetage  $\geq 30$  °C mehr), ist eine Erholung der Pflanzen an den steigenden Bewertungen zu erkennen. Diese gleichen sich bis Bonitur 22-15 (14. Oktober 2022) fast an die der maximal bewässerten Felder an.

*Tabelle 4-4: Skala Erscheinungsbild.*

| Skala | Wertung       |
|-------|---------------|
| 1     | ausgezeichnet |
| 2     | sehr gut      |
| 3     | gut           |
| 4     | mittelmäßig   |
| 5     | schlecht      |
| 6     | sehr schlecht |

Die minimal bewässerten Felder bleiben in der Wertung auch zu Jahresanfang leicht hinter den medial bewässerten Feldern zurück. Mit den stark steigenden Temperaturen im Juni (ab Bonitur 22-06, 10. Juni 2022) bricht die Wertung jedoch von „gut“ auf „schlecht“ stark ein. Die Ausschläge in der Wertung aufgrund der Hitzeperioden sind hier noch deutlicher zu erkennen. Die minimal bewässerten Felder zeigen jedoch ebenfalls eine leichte Erholung mit sinkenden Temperaturen. Sie werden jedoch bis zur Bonitur 22-17 (11. November 2022) kontinuierlich schlechter bewertet. Die gleich bepflanzten Felder der Standorte I und II spiegeln dieses Bild deutlich, während die Bewertung der Standorte III Abweichungen zeigt (Abbildung 4.3-2 bis Abbildung 4.3-4). Hier sind die Bewertungen uneinheitlicher, was damit zusammenhängen dürfte, dass das die im Vorjahr nachgepflanzten Individuen teilweise im Frühjahr eine verzögerte Entwicklung zeigten, die jedoch im Jahresverlauf kompensiert wurde.

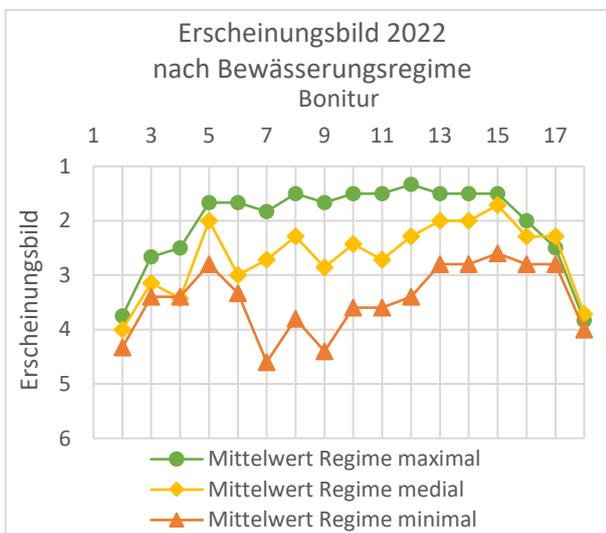


Abbildung 4.3-1: Mittelwert Erscheinungsbild aller Felder nach Bewässerungsregime.

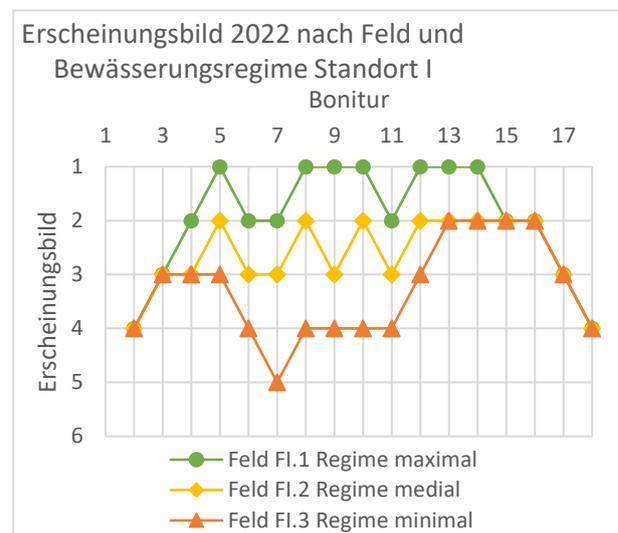


Abbildung 4.3-2: Erscheinungsbild der Felder FI.1, FI.2 und FI.3.

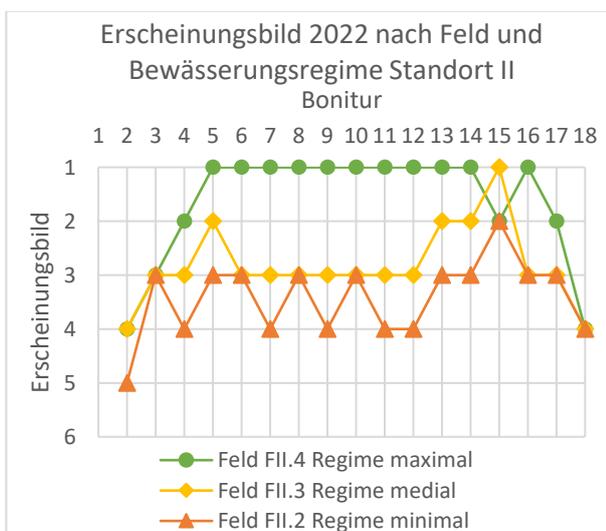


Abbildung 4.3-3: Erscheinungsbild der Felder FII.1, FII.2 und FII.3.

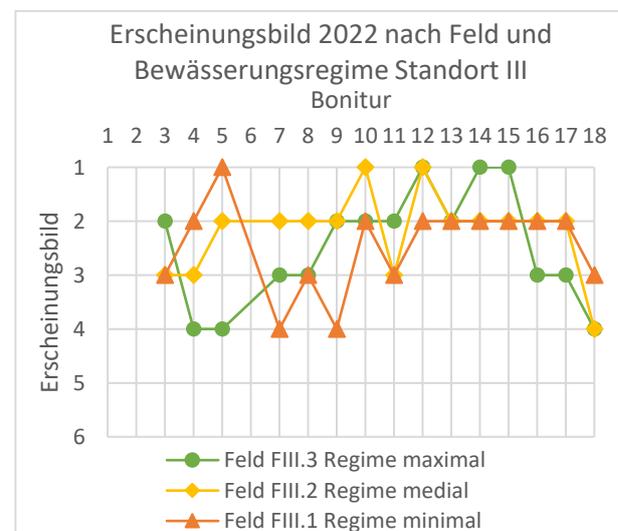


Abbildung 4.3-4: Erscheinungsbild der Felder FIII.1, FIII.2 und FIII.3.

Die dezidierte Betrachtung der Felder Fl.1, Fl.2 und Fl.3 des Standort I (tendenziell sonnig) veranschaulicht die Entwicklung im jahreszeitlichen Verlauf noch deutlicher. In der von extremer Hitze und Trockenheit geprägten Phase Mitte Juni (Bonitur 22-07 am 24. Juni 2022), ist eine Abweichung von 3 Stufen zwischen den unterschiedlich bewässerten Feldern festzustellen (Fl.1 „sehr gut“, Fl.3 „schlecht“).



*Bonitur 22-05, 27. Mai 2022.*



*Bonitur 22-07, 24. Juni 2022.*

*Abbildung 4.3-5: Bildvergleich Feld Fl.3 in Bonitur 22-05 und 22-07.*

Anhand aller drei Felder lassen sich die Auswirkungen der extremen klimatischen Gegebenheiten ablesen. Die häufigere Bewässerung der Felder Fl.1 und Fl.2 führt in diesem Zeitraum äquivalent zu einer höheren Bewertung der Erscheinung.

Die Wertung des Erscheinungsbildes von Feld Fl.3 schneidet im Vergleich jedoch deutlich schlechter ab. Dieses erreicht von Bonitur 22-03 (29. April 2022) bis 22-05 (27. Mai 2022) die Wertung „gut“. zeigt, dass die Bodenfeuchte in diesem Feld ab Juni rapide sinkt. Grund sind ausbleibende Niederschläge und stark steigende Temperaturen (Abbildung 4.3-6). Die alle vier Tage stattfindende Bewässerung kann den Wasserverlust nur bedingt ausgleichen. Nur vier Wochen später, am 24.06.22, wird das Erscheinungsbild desselben Feldes mit dem 2022 niedrigsten vergebenen Wert „schlecht“ besehen. Der Bildvergleich in Abbildung 4.3-5 verdeutlicht die vergebene Bewertung anschaulich. Die anhaltende Trockenheit führt zu einer durchgehend niedrigen Bewertung („mittelmäßig“) der Gesamterscheinung des Feldes, bis Ende August die Temperaturen sinken und es vermehrt zu Niederschlägen kommt.

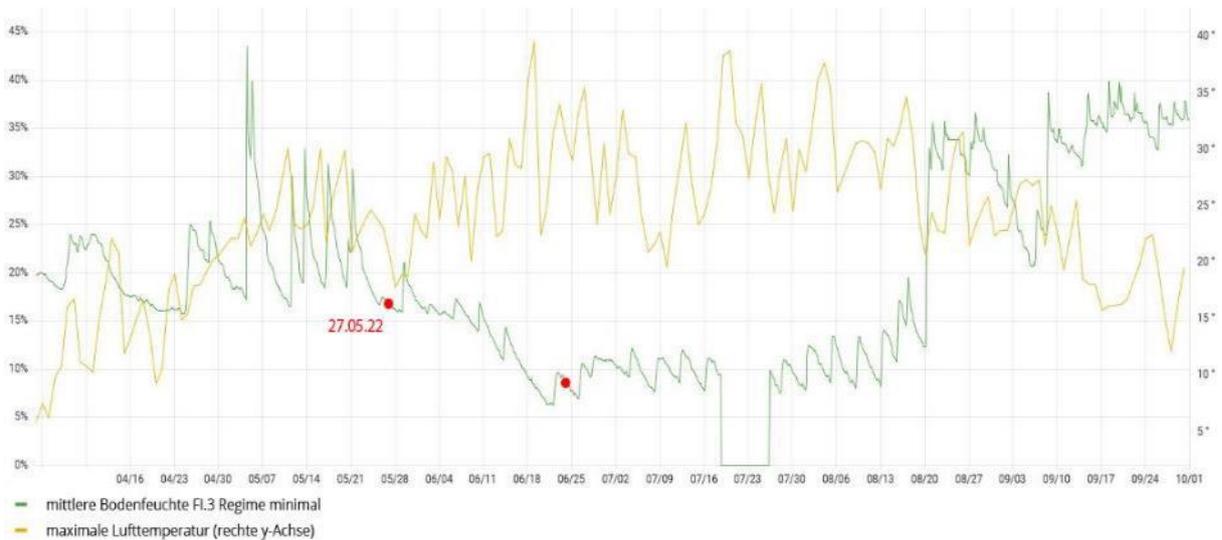


Abbildung 4.3-6: Lufttemperatur und Bodenfeuchte im Feld Fl.3 im Zeitraum 01.04. – 30.09.22.

#### 4.3.1.1. Deckungsgrad – optische Einschätzung

Der Deckungsgrad wird während der Bonitur mittels optischer Einschätzung ermittelt und stellt ein Referenzmaß zur graphischen Auswertung dar. In Abbildung 4.3-7 sind die gemittelten Deckungsgrade aller Felder aus 2022 mit maximalem, mittlerem und minimalem Bewässerungsregime dargestellt.

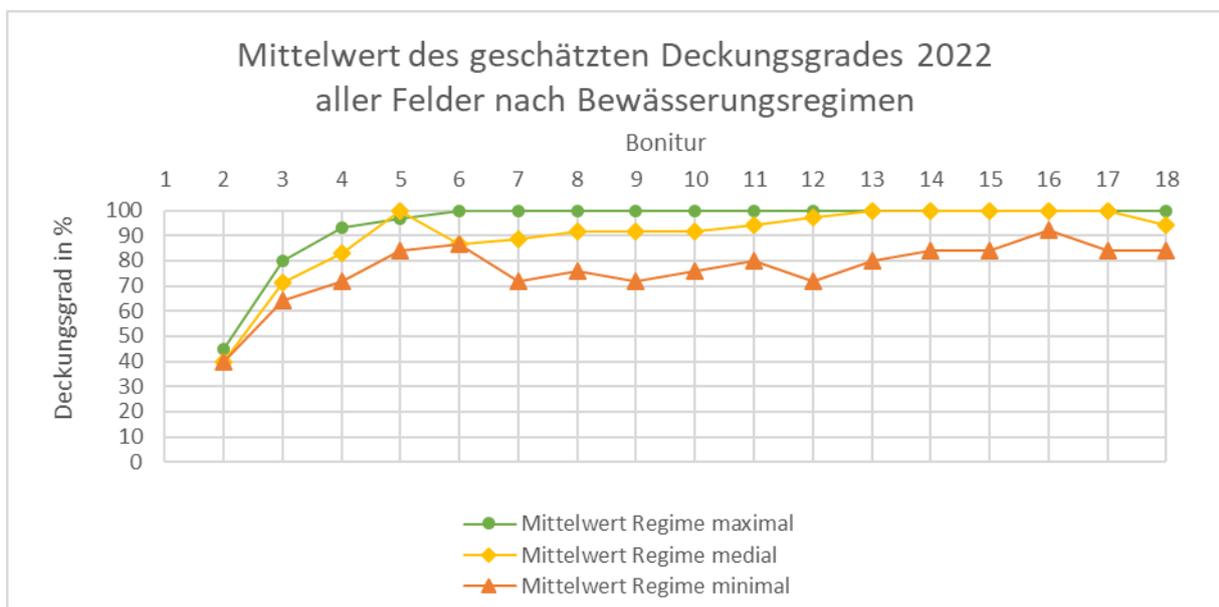


Abbildung 4.3-7: Vergleich der mittleren Deckungsgrade aller Forschungsfelder nach Bewässerungsregimen, erhoben nach optischer Einschätzung durch Boniteur:in.

Tabelle 5-1 stellt die verwendeten Bewässerungsregime dar, welche sich in Häufigkeit und Menge der Bewässerung unterscheiden. Die Wassermenge pro Bewässerung ist stets identisch. Die Felder, welche mit dem maximalen Bewässerungsregime eingerichtet wurden, weisen bis auf eine Ausnahme in Bonitur 22-05 (27. Mai 2022) durchgängig die höchste Bedeckung auf. Auffällig ist, dass der Deckungsgrad der Felder, die mit mittlerem

Bewässerungsregime eingerichtet sind, nur leicht unter dem der maximal bewässerten Felder liegt, obwohl die Bewässerungsmenge je m<sup>2</sup> zwischen medial und maximal um 0,6 mm/m<sup>2</sup>/d höher liegt, als zwischen minimal und medial. Die minimal bewässerten Felder weisen ab der Bonitur 22-03 (29. April 2022) durchgängig einen deutlich niedrigeren Grad der Bedeckung auf. Insbesondere ist hier mit einsetzen der Hitze- und Trockenperiode im Juni ein Rückgang des Deckungsgrades festzustellen. Ab Bonitur 22-14 (30. September 2022) ist eine leichte Zunahme des Deckungsgrads festzustellen, der auf höhere Niederschläge ab dieser Bonitur zurückzuführen ist. Insgesamt kann jedoch festgestellt werden, dass die Versorgung der Felder im minimalen Bewässerungsregime ausreichend ist, um auch in den Sommermonaten einen Deckungsgrad von ca. 70 % zu erzielen.

Die Betrachtung der Drohnenaufnahmen von 2022 der Felder FI.1, FI.2 und FI.3 (Standort I, tendenziell sonnig) veranschaulicht die Entwicklung der Felder entsprechend der jeweiligen Bewässerungsregime. Feld FI.1 wird täglich bewässert (Regime Maximal = 2,4 L/m<sup>2</sup>/d), Feld FI.2 alle zwei Tage (Regime Medial = 1,2 L/m<sup>2</sup>/d), Feld FI.3 alle vier Tage (Regime Minimal = 0,6 L/m<sup>2</sup>/d). Es ist durchgängig festzustellen, dass die Felder äquivalent zur Häufigkeit der Bewässerung einen höheren Deckungsgrad erzielen. Besonders in den Monaten Juni bis August, in welchen besonders viele Sommertage mit Temperaturen >25°C, sowie Hitzetage mit Temperaturen ≥ 30 °C auftraten (Abbildung 4.3-8), ist eine deutliche Verminderung des Deckungsgrades im minimal bewässerten Feld FI.3 zu beobachten (Bonitur 22-07 bis 22-10, 24. Juni bis 05. August 2022). Auch das medial bewässerte Feld FI.2 zeigt nach der andauernden Hitzeperiode im August eine kurzzeitige Verminderung des Deckungsgrades.

Bedingt durch die sinkenden Temperaturen und die vermehrten Niederschläge ab Ende August, ist bei der Bepflanzung eine deutliche Erholung, sowie eine starke Zunahme des Bedeckungsgrades festzustellen.

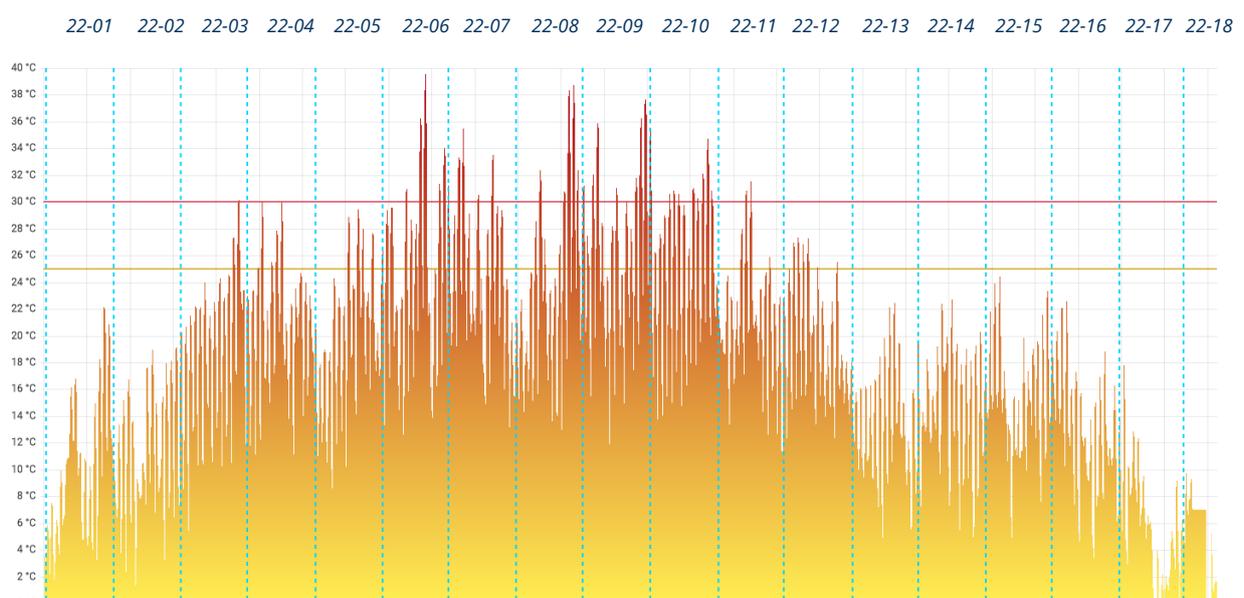
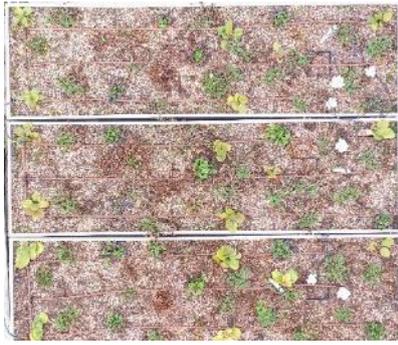


Abbildung 4.3-8: Lufttemperaturen im Zeitraum 01.04.-30.11.22 mit Markierung der Sommertage (gelbe Linie), Hitzetage (rote Linie) und den Bonituren (blau Linien).



*Bonitur 22-01, 01.04.22*



*Bonitur 22-02, 15.04.22*



*Bonitur 22-03, 29.04.22*



*Bonitur 22-04, 13.05.22*



*Bonitur 22-05, 27.05.22*



*Bonitur 22-06, 10.06.22*



*Bonitur 22-07, 24.06.22*



*Bonitur 22-08, 08.07.22*



*Bonitur 22-09, 22.07.22*



*Bonitur 22-10, 05.08.22*



*Bonitur 22-11, 19.08.22*



*Bonitur 22-12, 02.09.22*



*Bonitur 22-13, 16.09.22*



*Bonitur 22-14, 30.09.22*



*Bonitur 22-15, 14.10.22*



Abbildung 4.3-9: Bildvergleich der Drohnenaufnahmen der Forschungsfelder Fl.1 (unten, Maximalbewässerung), Fl.2 (Mitte, Medialbewässerung) und Fl.3 (oben, Minimalbewässerung) der Bonituren 2022 mit auffälligen Unterschieden im Deckungsgrad.

#### 4.3.1.2. Deckungsgrad – fotografische Auswertung

Die Auswertung mittels fotografischer Methode der Felder Fl.1, Fl.2 und Fl.3 nach langer Hitzeperiode am 19.08.22, zeigt die positive Auswirkung einer regelmäßigen Bewässerung in Feld Fl.1 im Vergleich zu Feld Fl.3 (Abbildung 4.3-9). Letzteres weist mit 66% einen 30% niedrigeren Deckungsgrad als Feld Fl.1 auf (Abbildung 4.3-10). Die Deckungsgradauswertung der Drohnenaufnahmen deckt sich prinzipiell mit der optischen Auswertung. In Abbildung 4.3-10 ist erkennbar, dass sich die nuanciertere Betrachtung durch die sehr präzise Auswertung bemerkbar macht. Es ist festzuhalten, dass die maximalbewässerten Felder, nachdem sie sich bis zur Bonitur 22-06 (10. Juni 2022) voll entwickelt haben, durchgängig ca. 95 % Deckungsgrad aufweisen. Dieser wird auch durch den besonders heißen Sommer im Extremfall zu Bonitur 22-10 (5. August 2022) nur kurzzeitig auf 92 % reduziert. Die gut mit Wasser versorgte Pflanzung kann den extremen Witterungsbedingungen also sehr gut standhalten. Die medial bewässerten Felder weisen im Mittel einen etwas niedrigeren Bedeckungsgrad auf. Sie liegen ca. 2-10 % hinter den maximal bewässerten Feldern zurück. Die extreme Trockenheit bis Bonitur 22-10 (5. August 2022) ist etwas deutlicher sichtbar. Die Pflanzung bleibt jedoch stabil.

| Feld | Drohnenaufnahme   | Deckung | Regime  |
|------|---|---------|---------|
| Fl.1 |   | 96 %    | 1-tägig |
| Fl.2 |   | 83 %    | 2-tägig |
| Fl.3 |  | 66%     | 4-tägig |

Abbildung 4.3-10: Bildvergleich der Forschungsfelder Fl.1 (Oben, Maximalbewässerung), Fl.2 (Mitte, Medialbewässerung) und Fl.3 (Unten, Minimalbewässerung) in Bonitur 22-11 am 19.August 2022 mit ermitteltem Deckungsgrad und Bewässerungszyklus.

Der Unterschied der minimal bewässerten Felder ist ungleich größer und durch die fotografische Auswertung sehr gut erkennbar. Die Hitzeperiode macht den Pflanzen sichtbar zu schaffen. In Bonitur 22-10 (5. August 2022) liegen die Felder mit 62 % Deckungsgrad um 30 % hinter den maximal bewässerten Feldern. In Abbildung 4.3-11 wird dieser Abstand verdeutlicht.

Beim Vergleich gleich bepflanzten der Standorte I und II mit dem Standort III lässt sich die Tendenz ablesen, dass die erhöhte Wassergabe des maximalen Regimes einen proportional höheren Deckungsgrad Vegetation generiert (Abbildung 4.3-12 und Abbildung 4.3-13). Die Pflanzen des Standortes III erreichen bereits bei medialer Bewässerung einen sehr hohen Deckungsgrad. Dieses ist vor allen Dingen auf die Dominanz der Art *Heuchera* zurückzuführen, die bei der gewählten Dichte zügig eine Fächendeckung erzielte. Grundsätzlich konnte hier jedoch mit einer mindestens medialen Bewässerung eine um eine Stufe höhere Bewertung erzielt werden, als mit dem minimalen Bewässerungsregime. Die Standorte I und II zeigen insbesondere in den heißen Perioden deutliche Abweichungen der Deckungsgraden, während in den kühleren und feuchteren Vegetationsperioden nur geringfügige Abweichungen der Deckungsgrade festzustellen waren.

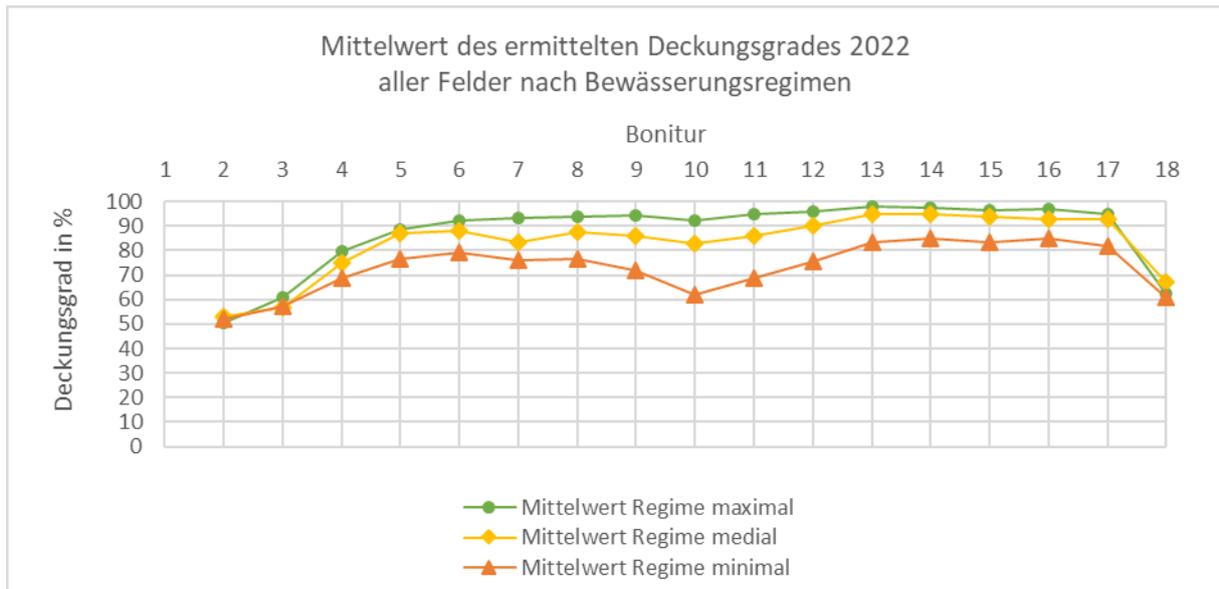


Abbildung 4.3-11: Vergleich der mittleren Deckungsgrade 2022 aller Forschungsfelder nach Bewässerungsregimen, erhoben durch graphische Auswertung.

Der Vergleich der ermittelten Deckungsgrade aus dem sehr trockenen und heißen Sommer 2022 mit dem kühleren und feuchteren Jahr 2021 verdeutlicht die Auswirkungen extremer Temperaturen und ausbleibender Niederschläge auf die Vegetation sehr anschaulich. Das sehr feuchte und milde Jahr 2021 führte zu einer sehr ähnlichen Entwicklung der verschiedenen bewässerten Forschungsfelder, da die Pflanzen zusätzlich zur regelmäßigen Bewässerung ausreichend mit Niederschlagswasser versorgt wurden. In Abbildung 4.3-14 ist erkennbar, dass die Unterschiede in der Entwicklung der Pflanzung nicht signifikant sind, zu Beginn des Jahres die maximal bewässerten Felder sogar im Deckungsgrad leicht hinter den medial und minimal bewässerten Feldern zurücklagen. Da sich die Vegetation im Jahr 2021 noch in der Anwuchsphase befand und nicht voll entwickelt war, könnten aus dem Vergleich der unterschiedlichen Witterungsverläufe noch keine validen Rückschlüsse gezogen werden. Hierzu bedarf es einer längerfristigen Betrachtung.

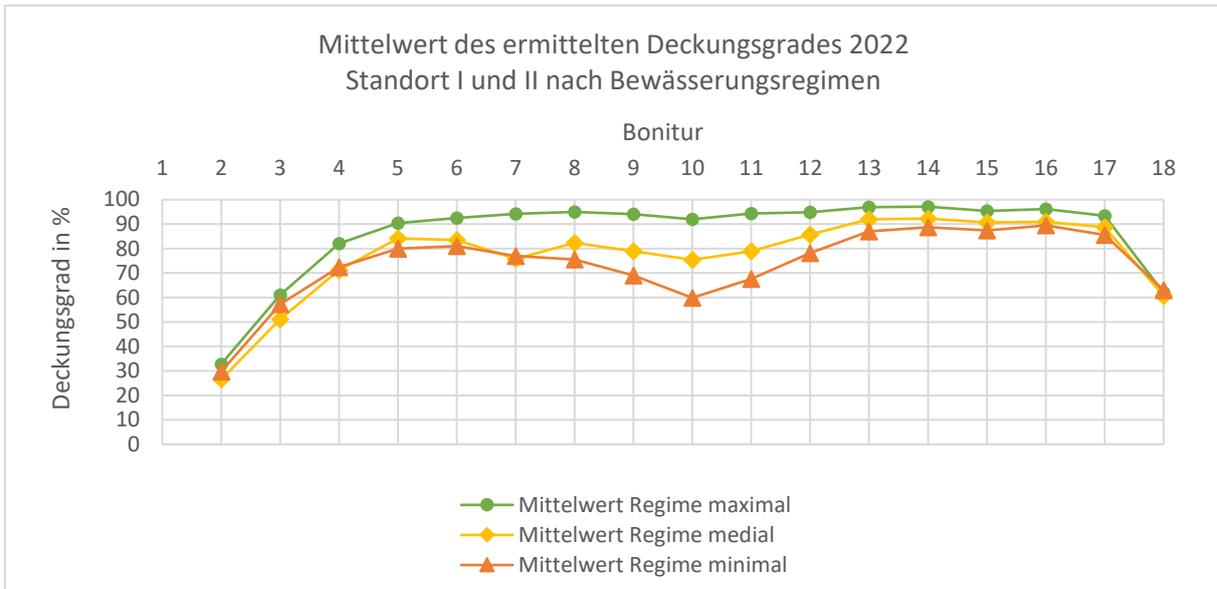


Abbildung 4.3-12: Vergleich der mittleren Deckungsgrade 2022 der Forschungsfelder aus Standort I und II nach Bewässerungsregimen, erhoben durch graphische Auswertung.

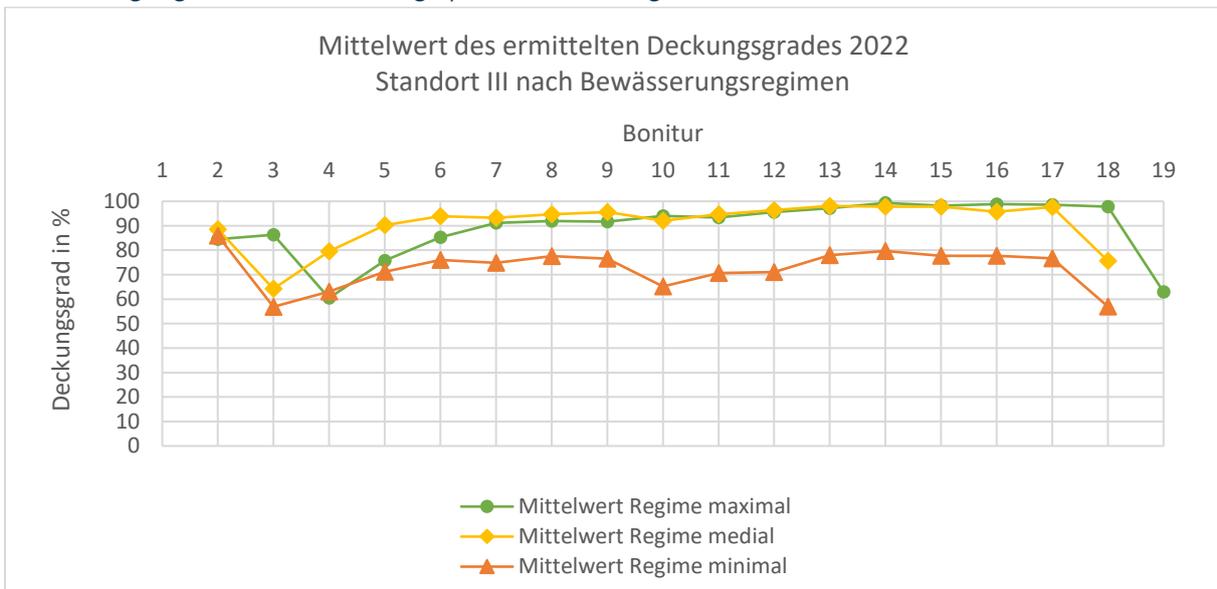


Abbildung 4.3-13: Vergleich der mittleren Deckungsgrade 2022 der Forschungsfelder aus Standort III nach Bewässerungsregimen, erhoben durch graphische Auswertung.

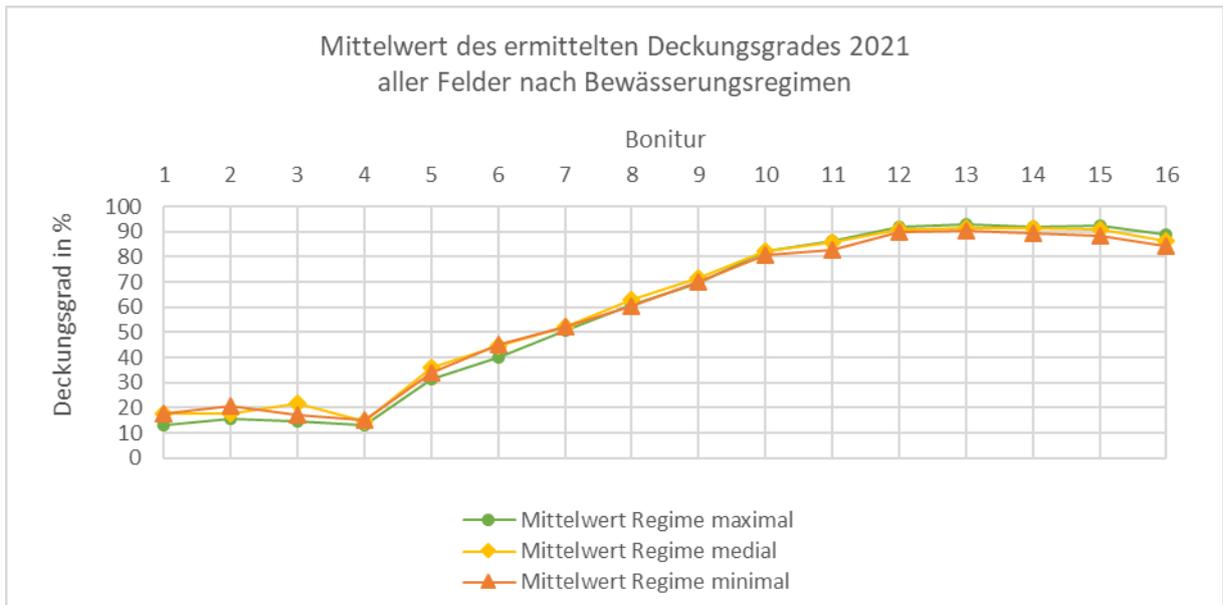


Abbildung 4.3-14: Vergleich der mittleren Deckungsgrade 2021 aller Forschungsfelder nach Bewässerungsregimen, erhoben durch graphische Auswertung.

#### Vergleich der Bewertungsmethoden

Die graphische Auswertung der Drohnenaufnahmen lässt eine sehr präzise Einschätzung zu. Für die wissenschaftliche Auseinandersetzung ist diese Präzision von großem Vorteil, zumal die optische Einschätzung bei wechselndem Personal zu variierenden Einschätzungen führen kann. Der in 2022 bis Bonitur 22-10 (05. August 2022) stetig abnehmende und dann wieder steigende Deckungsgrad lässt sich nur durch die graphische Auswertung erkennen.

Es sind Abweichungen zu den durch den Boniteur aufgenommenen Deckungsgraden durch optische Einschätzung von bis zu 0 bis 15% des Deckungsgrades festzustellen (Abbildung 4.3-15). Die optische Bewertung ergab einen in der Tendenz richtige

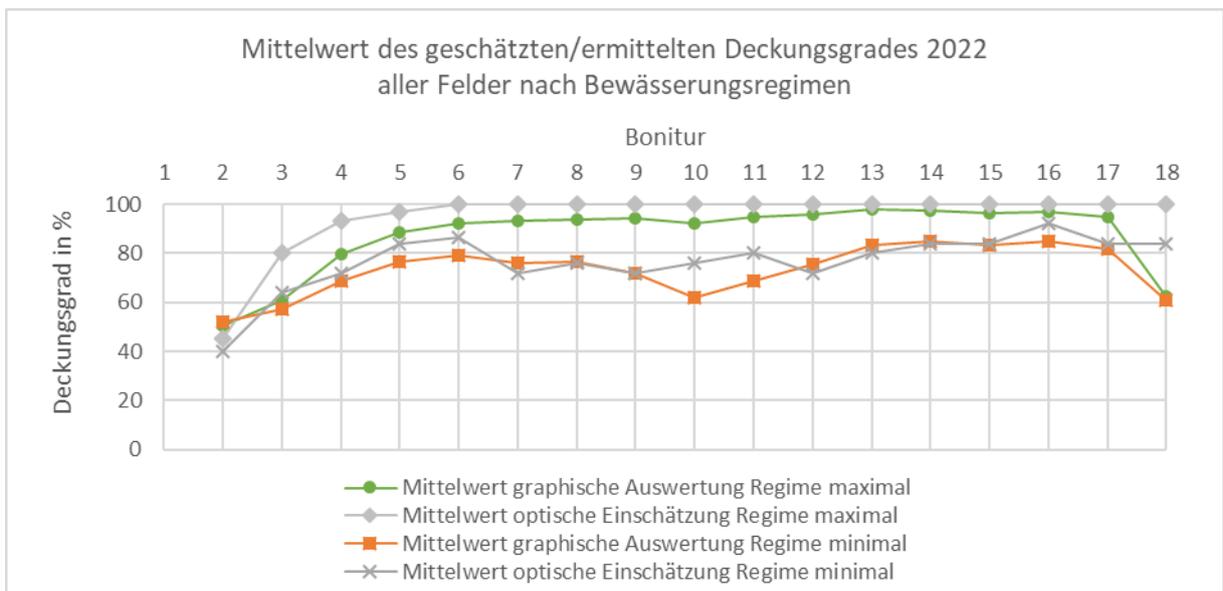


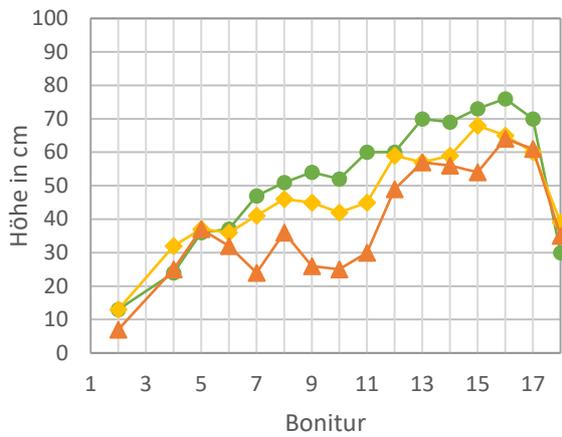
Abbildung 4.3-15: Vergleich der Methoden zur Ermittlung des Deckungsgrades.

Einschätzung, jedoch teilweise mit deutlichen Abweichungen von der graphischen Ermittlung. Demnach ist die optische Bewertung für eine grobe Einschätzung durchaus geeignet. Die graphische Auswertung mittels Drohnenaufnahmen liefert deutlich präzisere, objektive Ergebnisse, sie ist jedoch mit einem deutlich höheren Zeitaufwand verbunden. Die einfache Schätzung des Deckungsgrades vor Ort steht einem sehr zeitaufwändigen, technischen Verfahren gegenüber, in welchem Aufnahmen mittels UAV (Unmanned Aerial Vehicle) aus einer festgelegten Höhe erstellt, digitalisiert, in einem Graphikprogramm (z.B. Adobe Photoshop) eingelesen und freigestellt werden, um dann über die Farbauswahl, sowie häufig notwendige manuelle Korrektur, die lebendigen Pflanzenteile auszuwählen und den prozentualen Anteil am Gesamtfeld zu errechnen. Für die präzise Auswertung wie sie für wissenschaftliche Betrachtungen erforderlich ist, könnte die Anwendung eines Verfahrens des maschinellen Lernens sinnvoll sein, das eine automatisierte Klassifikation von Vegetation aus UAV-Aufnahmen erlaubt. Ziel ist dabei die Verminderung des Aufwands der Auswertung. Die Entwicklung und Erprobung einer derartigen automatisierten Bonitur sollte Gegenstand Folgeforschungsprojektes sein. Mit solchen Verfahren könnten auch praxisrelevante Anforderungen, z.B. die Einschätzung des Anwuchserfolges von Dachbegrünungen, Stauden-, oder Rasenflächen Anwendungsfeld der zu entwickelnden Technik sein.

#### *4.3.1.3.Höhenentwicklung*

In der dritten Vegetationsperiode finden sich deutliche Hinweise auf eine erhöhte Wuchsleistung in den mit dem Bewässerungsregime „Maximalbewässerung“ eingerichteten Forschungsfeldern. Abbildung 4.3-16 und Abbildung 4.3-17 und zeigen die ermittelten maximalen Höhen von *Bistorta amplexicaulis* in je drei Feldern auf den Standorten I und II nach Bewässerungsregimen. Es sind deutliche Unterschiede zwischen den Standorten (tendenziell sonnig und tendenziell halbschattig bis sonnig) zu verzeichnen, was auf die Besonnungssituation zurückzuführen ist. Die Art, welche auf sonnig bis halbschattigen Standorten optimal erzielt auf den halbschattigen Standorten größere Wuchshöhen. Ab der Bonitur 22-06 (10. Juni 2022) ist jedoch auf beiden Standorten in den Feldern mit maximalem Bewässerungsregime ein deutlich höheres Wachstum zu erkennen. Auf dem tendenziell sonnigen Standort erreichen die Pflanzen im maximal bewässerten Feld zwischen Bonitur 22-06 und 22-11(10. Juni bis 19. August 2022) ca. 10 cm mehr Wuchshöhe als die medial bewässerten und bis zu 35 cm mehr als die minimal bewässerten. Auf dem tendenziell halbschattigen Standort erreichen die Pflanzen im maximal bewässerten Feld zwischen Bonitur 22-07 und 22-11 (24. Juni bis 19. August 2022) zwischen 5 – 30 cm mehr Wuchshöhe als die medial bewässerten und 15 - 40 cm mehr als die minimal bewässerten.

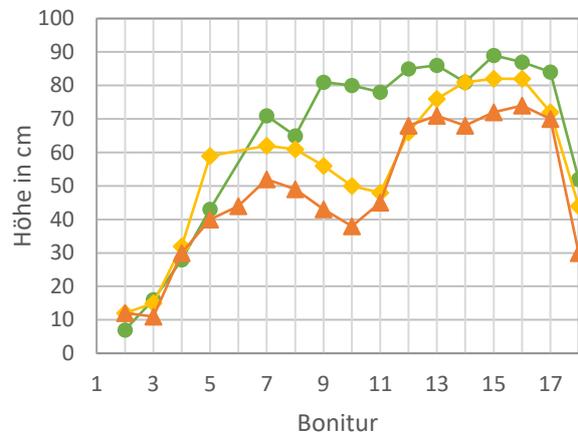
Maximalhöhe Bistorta 2022 nach Feld und Bewässerungsregime Standort I



- Feld FI.1 Bistorta Maximalhöhe Regime maximal
- ◆ Feld FI.2 Bistorta Maximalhöhe Regime medial
- ▲ Feld FI.3 Bistorta Maximalhöhe Regime minimal

Abbildung 4.3-16: Vergleich der Maximalhöhe von Bistorta in den Feldern FI.5, FI.6 und FI.7.

Maximalhöhe Bistorta 2022 nach Feld und Bewässerungsregime Standort II



- Feld FII.7 Bistorta Maximalhöhe Regime maximal
- ◆ Feld FII.6 Bistorta Maximalhöhe Regime medial
- ▲ Feld FII.5 Bistorta Maximalhöhe Regime minimal

Abbildung 4.3-17: Vergleich der Maximalhöhe von Bistorta in den Feldern FI.1, FI.2 und FI.3.

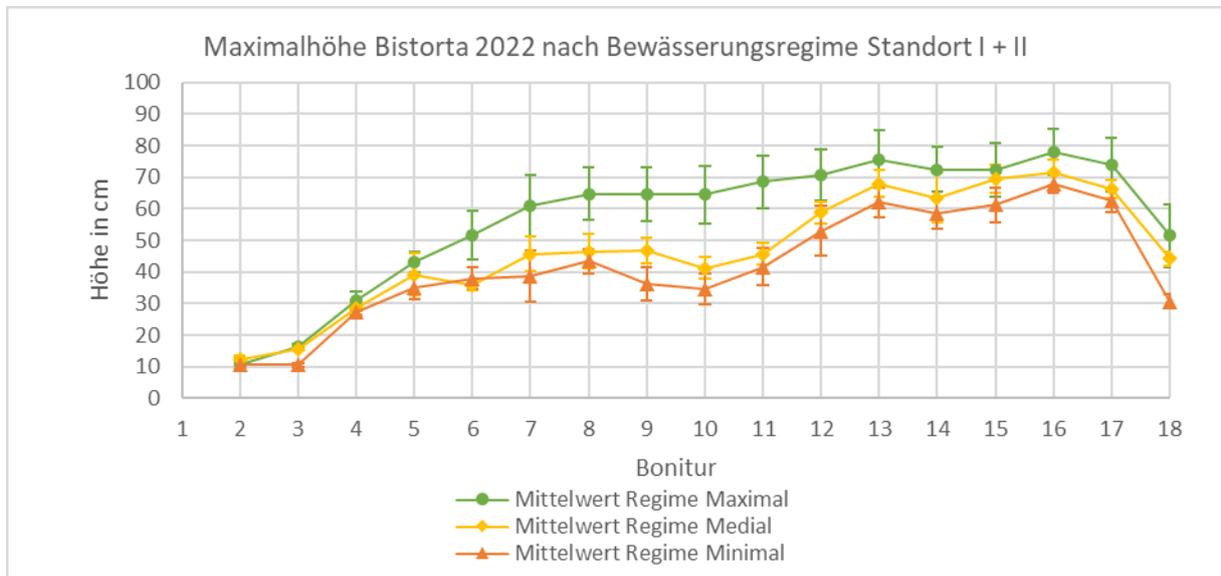


Abbildung 4.3-18: Vergleich der Maximalhöhe von Bistorta in allen Feldern der Standort I+II.

Bei der Betrachtung der maximalen Wuchshöhe von Bistorta in allen vorkommenden Feldern nach Bewässerungsregimen fällt ebenfalls auf, dass die maximal bewässerten Standorte ab Bonitur 22-07 (24. Juni 2022) eine deutlich größere Wuchshöhe aufweisen, als die weniger stark bewässerten Standorte. Insbesondere in den heißen und trockenen Perioden führt bei dieser Art die Verdopplung der Wassermenge bereits im Juni zum

Erreichen der Maximalhöhe, während diese Höhe bei den anderen Regimen erst im September erreicht wird (Abbildung 4.3-18). Auch die Betrachtung der Art *Lysimachia* in den Standorten I und II zeigt eine ähnliche Entwicklung mit deutlich höheren Wuchshöhen in den trocknen Sommermonaten bei der Bewässerung mit dem maximalen Regime. Die Art *Heuchera* zeigt analog zur Auswertung des Deckungsgrades keine eindeutige Korrelation der Höhenentwicklung mit der Bewässerungsintensität.

Bei der Betrachtung der maximalen Wuchshöhe aller Arten aller Forschungsfelder nach Bewässerungsregimen in Abbildung 4.3-19 ist eine relativ gleichmäßige Abstufung der erreichten Wuchshöhen äquivalent zu den Bewässerungsregimen, mit der sie versorgt wurden zu beobachten. Die bei *Bistorta* beobachteten starken Abstufungen in der Wuchshöhe werden im Querschnitt durch Arten wie *Heuchera*, oder *Bergenia* etwas abgeschwächt, da diese als vergleichsweise trockenheitstolerante Arten nicht so deutlich auf die unterschiedlichen Bewässerungsregime reagieren.

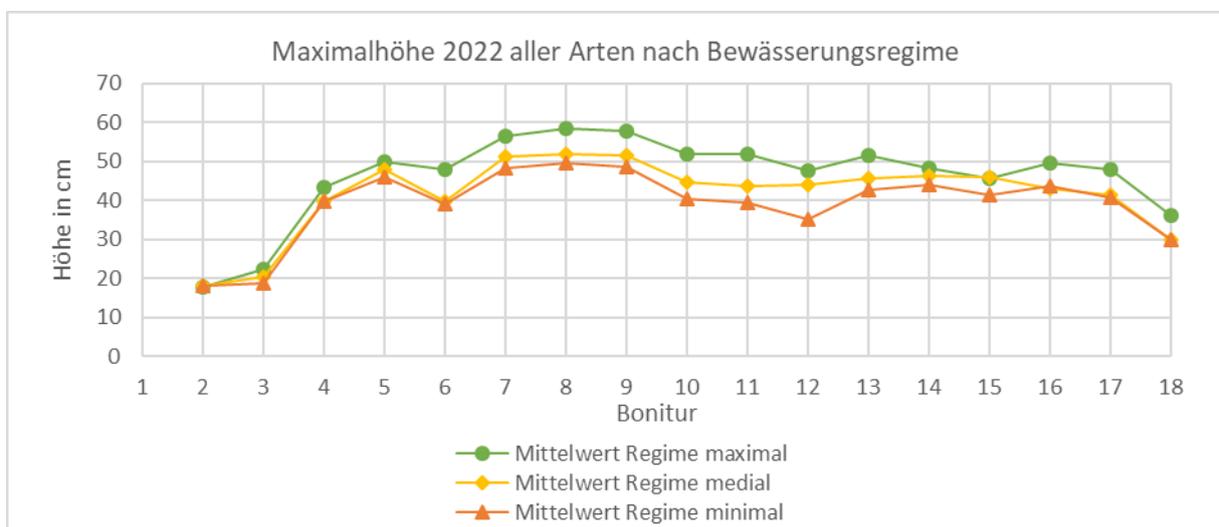


Abbildung 4.3-19: Vergleich der Maximalhöhe aller Arten in allen Feldern nach Bewässerungsregimen.

#### 4.3.1.4. Blühverhalten

Bei der Betrachtung des Blühverhaltens (Einschätzung durch Bonitur nach Skala in Tabelle 4-5) treten im Verlauf der Vegetationsperiode Auffälligkeiten auf. Früh blühende Arten wie *Brunnera* zeigen keine signifikanten Unterschiede in der Blütenbildung in Abhängigkeit zur Bewässerung (Abbildung 4.3-20). Die Blühdauer ist arttypisch, da zu diesem Zeitpunkt noch keine außergewöhnlichen klimatischen Bedingungen vorherrschen und sich die Blüten ungestört entwickeln können. Für *Bergenia cordifolia* konnte eine ähnliche Entwicklung festgestellt werden. Da diese Pflanzenart erst 2021 eingebracht wurde und zum Zeitpunkt der Bonitur noch nicht voll entwickelt war, bleibt zu beobachten, ob die starke Bewässerung die Herbstblüte einschränkt, wie dieses die Ergebnisse des ersten Boniturjahres zeigen. Die Arten *Geranium* und *Lysimachia* zeigten analog zu *Brunnera* keine Abweichungen der Blütenentwicklung bei unterschiedlichen Bewässerungsregimen, da beide Arten im Frühjahr bis Juni zur Blüte kommen.

Tabelle 4-5: Skala Blühverhalten.

| Skala | Wertung             |
|-------|---------------------|
| 1     | keine Blüten        |
| 2     |                     |
| 3     | wenige Blüten       |
| 4     |                     |
| 5     | normal viele Blüten |
| 6     |                     |
| 7     | zahlreiche Blüten   |
| 8     |                     |
| 9     | sehr viele Blüten   |

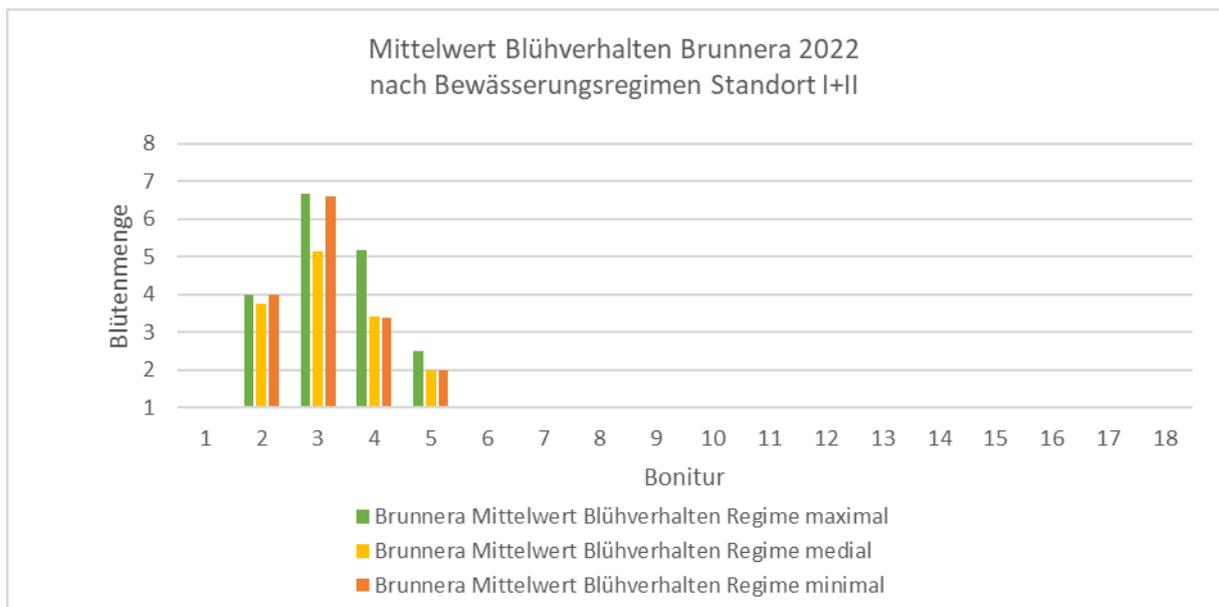


Abbildung 4.3-20: Vergleich des Blühverhaltens von Brunnera in den Feldern von Standort I und II.

Bei den spät blühenden Arten *Bistorta* oder *Heuchera* hingegen, deren Blühphase in die Monate mit sehr viel geringeren Niederschlägen und höheren Temperaturen fällt, sind deutliche Unterschiede in der Blütenbildung zwischen den Bewässerungsregimen zu erkennen (Abbildung 4.3-21). Individuen in Feldern, welche mit dem maximalen Regime bewirtschaftet wurden, zeigen in den Monaten Juni bis September (22-06 bis 22-14, 10. Juni bis 30. September 2022) eine deutlich höhere Blütenbildung als in minimal bewässerten Feldern. Die Individuen in maximal bewässerten Feldern zeigen von Bonitur 22-06 bis 22-13 (10. Juni bis 16. September 2022) durchgängig eine um eine bis drei Stufen höhere Bewertung. Erst mit der Bonitur 22-14 (30. September 2022) zeigen auch die Exemplare mit medialer Bewässerung eine ähnlich hohe bzw. um eine Stufe höhere Blütenaktivität. Die Exemplare in Feldern mit minimaler Bewässerung erreichen zu keinem Zeitpunkt die Bewertung der Exemplare mit maximaler Bewässerung. Insgesamt werden die Exemplare in maximal bewässerten Feldern im Vergleich aller Bonituren um 1,3 Stufen besser bewertet als in minimal bewässerten Feldern, im Zeitraum Juli bis September (Bonituren 22-08 bis 22-13, 08. Juli bis 16. September 2022) durchschnittlich 3,1 Stufe besser.

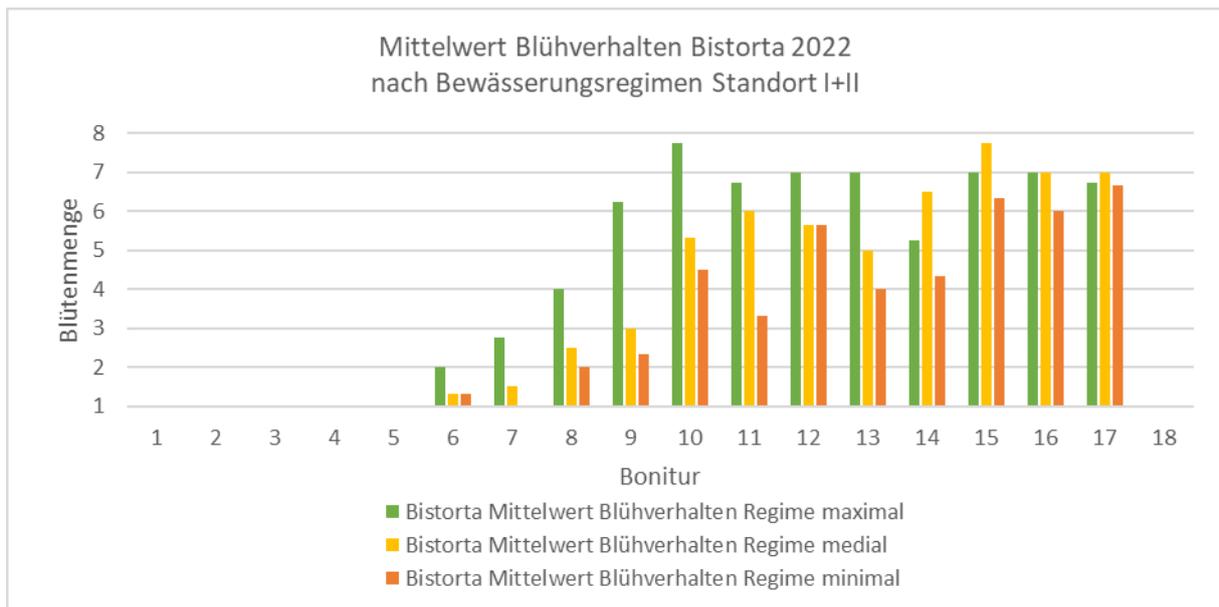


Abbildung 4.3-21: Vergleich des Blühverhaltens von Bistorta in den Feldern von Standort I und II.

Ein sehr ähnliches Bild zeichnet sich bei den Feldern auf Standort III bei der Betrachtung von Heuchera ab (Abbildung 4.3-23). Zu Beginn der Blüte ist ab Bonitur 22-09 (22. Juli 2022) in den maximal bewässerten Feldern eine stark gesteigerte Blütenbildung zu beobachten. Auch bei dieser Art zeigen die Individuen der minimal bewässerten Felder nach den sinkenden Temperaturen ab Bonitur 22-12 (02. September 2022) noch etwas verspätet eine stärkere Blütenbildung. Die niedrigen Werte der maximal bewässerten Felder in Bonitur 22-16 (28. Oktober 2022) und die Schwankungen sind mutmaßlich auf Schwierigkeiten bei der Bewertung durch den Boniteur zurückzuführen. Der Bildvergleich in Abbildung 4.3-22 zeigt, dass zu dieser Zeit keine Änderung der Blütenzahl stattgefunden hat, jedoch einzelne Blüten bereits verwelken.



Bonitur 22-16 am 28. Oktober 2022.



Bonitur 22-17 am 11. November 2022.

Abbildung 4.3-22: Bildvergleich der Forschungsfelder FIII.1-3 in Bonitur 22-16 (28. Oktober 2022) und 22-17 (11. November 2022).

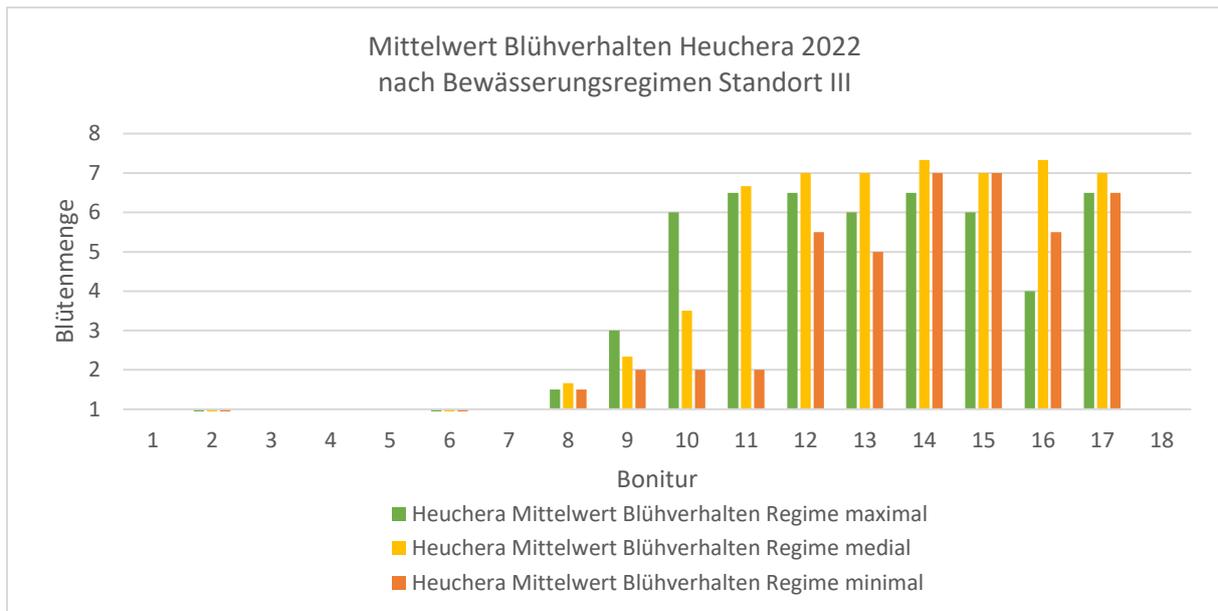


Abbildung 4.3-23: Vergleich des Blühverhaltens von Heuchera in den Feldern von Standort III.

Bei der Heuchera sind in den medial bewässerten Feldern in den Bonituren 22-14 und 22-15 (30. September und 14. Oktober 2022) mehr Blüten vorhanden. In Bonitur 22-14 (30. September 2022) werden die maximal bewässerten Felder mit 5,25 (normal viele Blüten) und die medial bewässerten Felder mit 6,5 (zahlreiche Blüten) bewertet. In Bonitur 22-15 (14. Oktober 2022) werden die maximal bewässerten Felder mit 7,0 (zahlreiche Blüten) und die medial bewässerten Felder mit 7,75 (zahlreiche bis sehr viele Blüten) bewertet. In den folgenden Bonituren verbleiben die Felder auf einem sehr ähnlichen Niveau und weisen bis zum Ende der Vegetationsperiode insgesamt eine hohe Blütenzahl auf.

Die deutlich vermehrte Blütenbildung in den Sommermonaten, äquivalent zur größeren Bewässerungsmenge, führt in der Folge zu einem ästhetischen Mehrwert durch häufigere Bewässerung. Zudem ist bei Verwendung insektenfreundlicher Arten von einem höheren Nahrungsangebot bei häufigerer Bewässerung für Insekten auszugehen (Tabelle 4-6).

Tabelle 4-6: Verwendete Arten und Insektenfreundlichkeit.

| Pflanze                           | Bienenweide |
|-----------------------------------|-------------|
| Bergenia cordifolia               | ✓           |
| Bistorta amplexicaulis            | ✓           |
| Brunnera macrophylla              | x           |
| Geranium x magnificum ‚Rosemoore‘ | ✓           |
| Heuchera villosa var. macrorrhiza | ✓           |
| Kirengeshoma palmata              | x           |
| Lysimachia punctata               | ✓           |
| Telekia speciosa                  | ✓           |

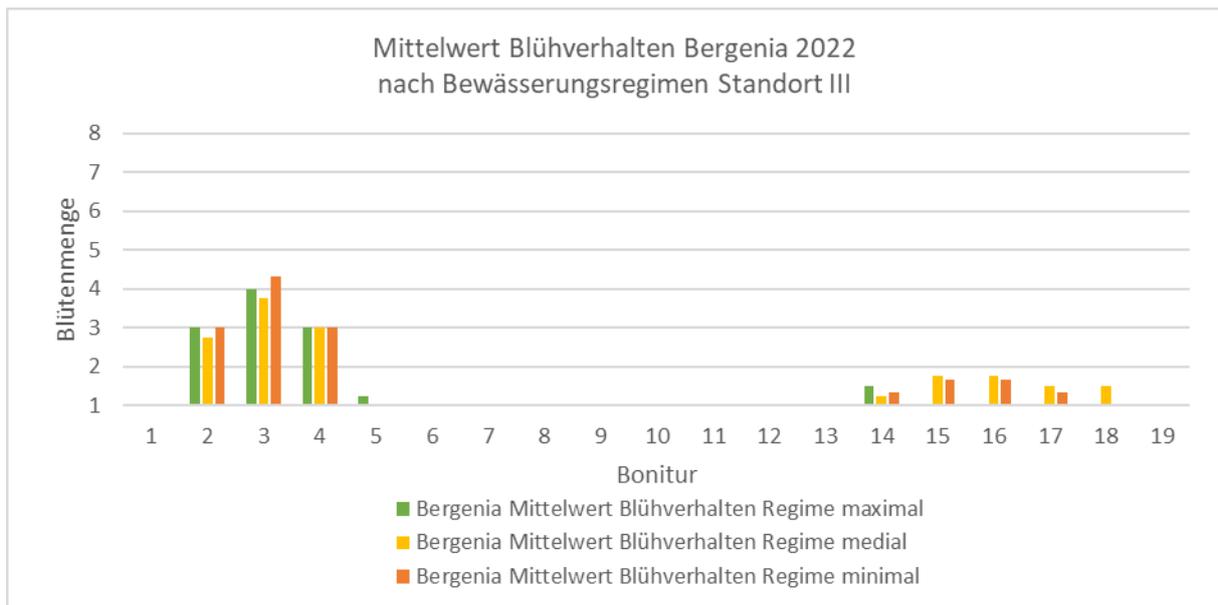


Abbildung 4.3-24: Vergleich des Blühverhaltens von Bergenia in den Feldern von Gruppe III.

#### 4.3.1.5. Blattanzahl

Die Anzahl der Blätter (Bewertung nach Tabelle 4-7) der Pflanzen ist zu Beginn der Vegetationsperiode bei allen Arten und Bewässerungsregimen im Vergleich relativ gleich verteilt (Abbildung 4.3-25), Ab Bonitur 22-06 (10. Juni 2022) schneiden die medial und minimal bewässerten Felder jeweils um eine halbe bis eine Stufe schlechter ab. Zum Ende der Vegetationsperiode gleichen sich die Blattmengen in den unterschiedlich bewässerten Feldern an

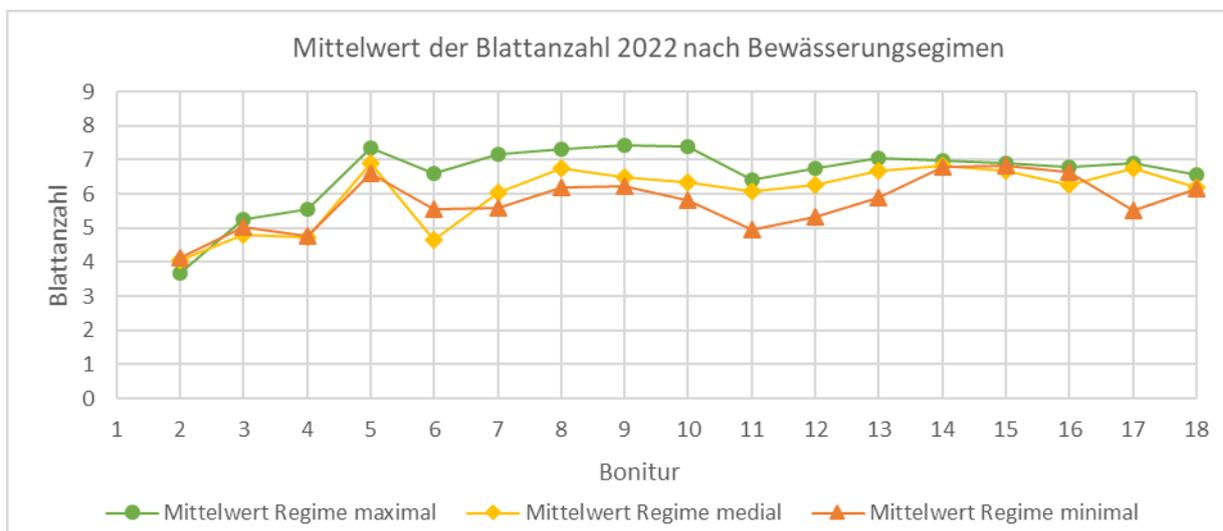


Abbildung 4.3-25: Vergleich der Blattanzahl aller Arten in allen Feldern nach Bewässerungsregime.

Tabelle 4-7: Skala Blattanzahl.

| Skala | Wertung              |
|-------|----------------------|
| 1     | keine Blätter        |
| 2     |                      |
| 3     | einzelne Blätter     |
| 4     |                      |
| 5     | normal viele Blätter |
| 6     |                      |
| 7     | zahlreiche Blätter   |
| 8     |                      |
| 9     | sehr viele Blätter   |

Tabelle 4-8: Skala Blattgröße.

| Skala | Wertung              |
|-------|----------------------|
| 1     | sehr kleine Blätter  |
| 2     |                      |
| 3     | kleine Blätter       |
| 4     |                      |
| 5     | normal große Blätter |
| 6     |                      |
| 7     | große Blätter        |
| 8     |                      |
| 9     | sehr große Blätter   |

#### 4.3.1.6. Blattgröße

Die Blattgröße der Pflanzen (Bewertung nach Tabelle 4-8) wurde bis auf den Beginn der Vegetationsperiode im Mittel durchgängig äquivalent zu den Bewässerungsregimen mit welchen sie versorgt wurden eingeschätzt (Abbildung 4.3-26). Häufigere Wassergaben führen zu einer besseren Entwicklung der Blätter bzw. zu einer jeweils um eine Stufe verbesserte Bewertung. Mit sinkendem Wasserangebot Anfang Juni verringerte sich die Blattgröße aller Pflanzen, jedoch besonders stark in Feldern mit medialem oder minimalem Bewässerungsregime. Auch die Pflanzen, welche mit dem maximalen Regime versorgt wurden, reagieren mit einem leichten Rückgang der Blattgröße auf die Hitzeperiode. In allen Feldern entwickeln sich die Blätter äquivalent zum Bewässerungsregime in einer ähnlichen Weise. Bis Bonitur 22-13 (16. September 2022) unterscheidet sich die Wertung der Regime um ca. eine Stufe, bis sich die Blattgröße in allen Regimen ab Mitte September angleicht.

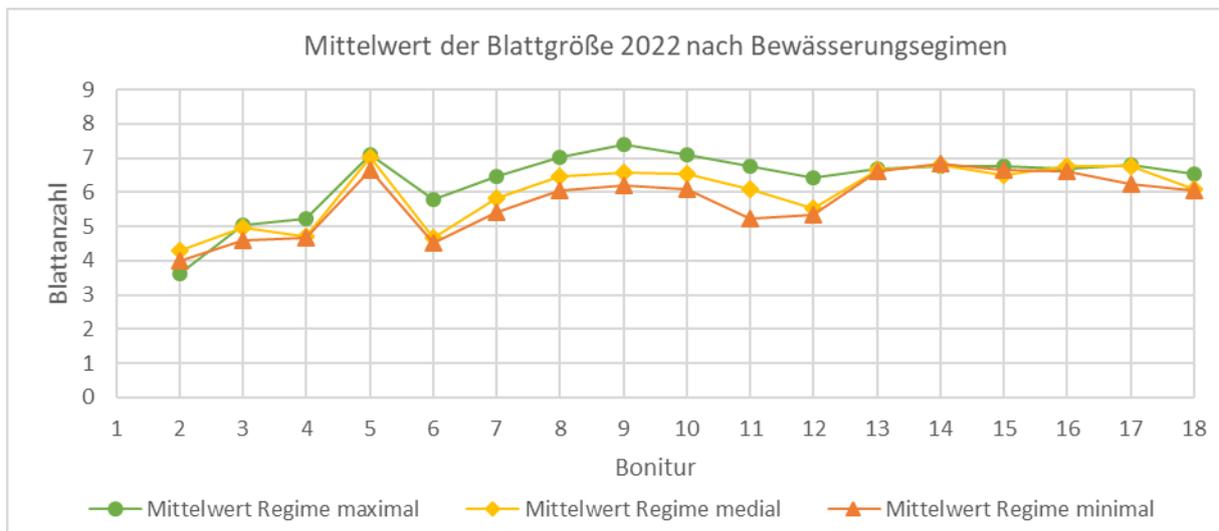


Abbildung 4.3-26: Vergleich der Blattgröße aller Arten in allen Forschungsfeldern nach Bewässerungsregime.

#### 4.3.1.7. Blattgesundheit

Die Blattgesundheit der Pflanzen (Bewertung nach Tabelle 4-9) wurde im Mittel äquivalent zu den Bewässerungsregimen mit welchen sie versorgt wurden eingeschätzt. Generell

sind die Bewertungen insgesamt hoch. Sie bewegen sich auf der 9-teiligen Skala im Bereich von 5 bis  $\leq 8$ , was einem Zustand von mäßig (blässlich) bis gesund (gut im Saft, druckresistent) entspricht. Die Unterschiede der Wertungen zum jeweils niedrigeren Regime sind bei der Betrachtung der Mittelwerte in Abbildung 4.3-27 über alle Forschungsfelder größtenteils niedrig ( $\leq 1$  Stufe). Z. T. kommt es zu gleichen Wertungen in den unterschiedlichen Bewässerungsregimen, besonders zu Beginn und Ende der Vegetationsperiode. Auch die Betrachtung der einzelnen Arten (Abbildung 4.3-28 und Abbildung 4.3-29) zeigt, dass die Unterschiede der Wertungen zum jeweils niedrigeren Regime größtenteils niedrig sind. Hier treten vereinzelt geringfügig größere Abstände auf ( $\leq 2$  Stufen). Die Bewässerungs-regime haben somit nur einen mäßigen Einfluss auf die Gesundheit der Blätter. Sie bewegt sich bedingt durch die Bewässerung jedoch überwiegend im gesunden bis mäßig gesunden Bereich.

*Tabelle 4-9: Skala Blattgesundheit.*

| Skala | Wertung  |
|-------|--|
| 1     | schlecht (farblos, schlaff)                                  |
| 2     |  |
| 3     | gering (blass, hängend, weich)                               |
| 4     |  |
| 5     | mäßig (blässlich)  |
| 6     |  |
| 7     | gesund (gut im Saft, druckresistent)                         |
| 8     |  |
| 9     | sehr gesund (glänzend, kräftig, saftig, prall, farbintensiv) |

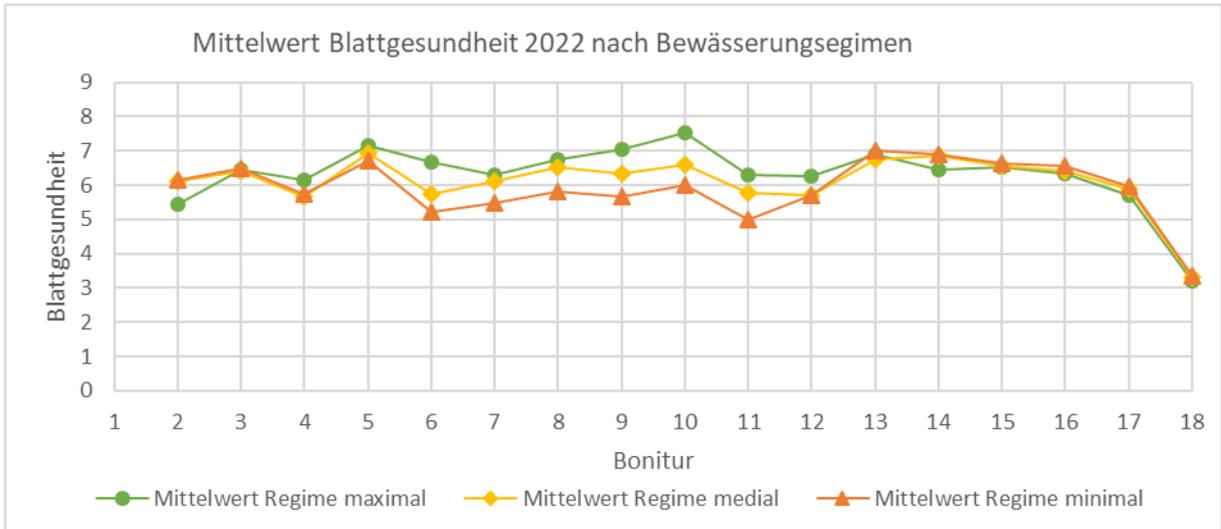


Abbildung 4.3-27: Vergleich der Blattgesundheit aller Arten in allen Forschungsfeldern nach Bewässerungsregime.

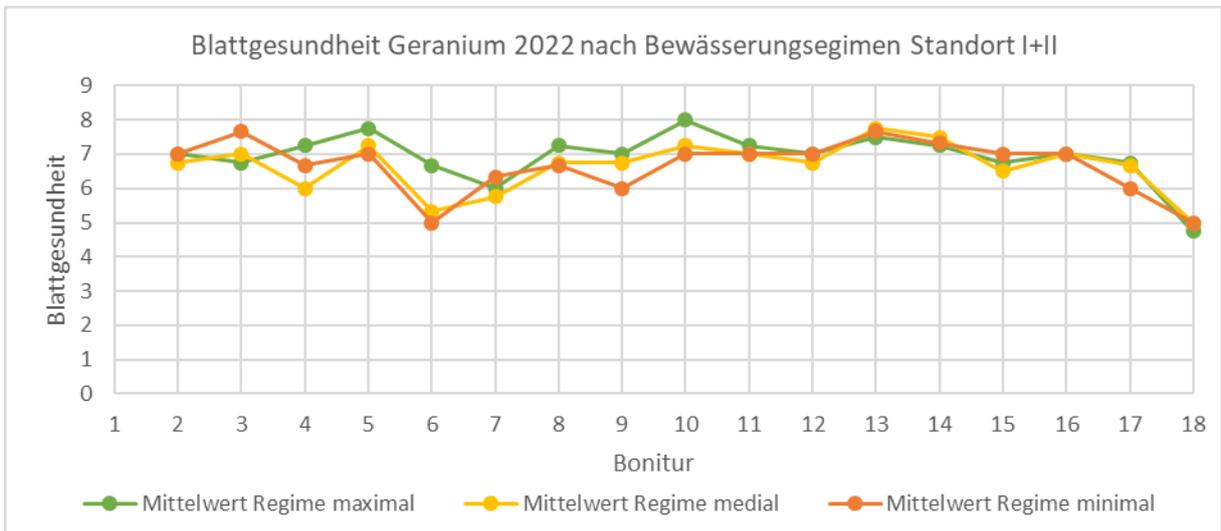


Abbildung 4.3-28: Vergleich der Blattgesundheit von Geranium in allen Forschungsfeldern.

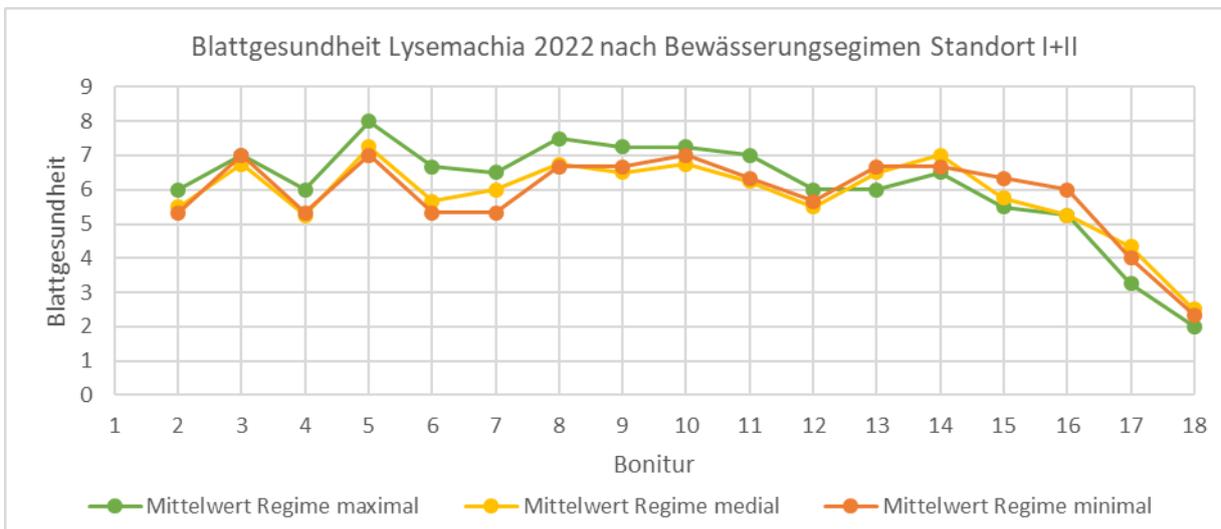


Abbildung 4.3-29: Vergleich der Blattgesundheit von Lysemachia in allen Forschungsfeldern.

#### 4.3.1.9. Volumetrische Auswertung

Für eine zusätzliche grobe volumetrische Betrachtung der Pflanzung wurden die Felder der Standorte I und II, welche dieselbe Pflanzenzusammensetzung aufweisen, hinsichtlich des Deckungsgrades und der Höhenentwicklung für 2022 analysiert. Außerdem erfolgte eine dezidierte Betrachtung der Lysimeterfelder FI.1, FI.2 und FI.3 des Standortes I in 2022 an drei für die interdisziplinäre Auswertung günstigen Terminen mit hoher Strahlungsbilanz. Die Berechnung der Volumina beschränkt sich auf Geranium und Bistorta, da diese volumetrisch die dominierenden Pflanzen in den Feldern darstellen. Es wird angenommen, dass Bistorta  $1/3$  und Geranium  $2/3$  der bewachsenen Fläche einnimmt. Es wurden die in den Bonituren ermittelten mittleren Wuchshöhen der jeweiligen Arten verwendet. Die Bewertung kann lediglich als grober Vergleichswert herangezogen werden, da der Pflanzenanteil von Bistorta zu Geranium im jahreszeitlichen Verlauf leichte Abweichungen aufweisen kann, welche hier vernachlässigt werden.

Die Betrachtung der volumetrischen Entwicklung aller Felder an den Standorten I + II (Abbildung 4.3-30) zeigt, dass die Arten in den maximal bewässerten Feldern ein deutlich höheres Pflanzenvolumen aufbauen können. Es werden Volumina von bis zu ca. 1700 Liter ( $1,7 \text{ m}^3$ ) erreicht. Auch in der Trockenperiode und dem niedrigsten gemessenen Wert in Bonitur 22-10 (05. August 2022), bleiben die maximal bewässerten Felder stabil auf ca. 1400 L ( $1,4 \text{ m}^3$ ) Pflanzenvolumen.

Die medial und minimal bewässerten Felder bleiben dagegen in ihrer Entwicklung in den Sommermonaten deutlich zurück. An Bonitur 22-10 (05. August 2022), erreichen die minimal bewässerten Felder in Durchschnitt etwa 580 Liter, die medial bewässerten Felder 840 Liter und weisen somit eine Differenz von 820 Litern (min.) und 570 Litern (mean.) zu den maximal bewässerten Feldern auf. Die Entwicklung der medial und minimal bewässerten Felder unterscheidet sich im Jahresverlauf nur um 0 – 260 Liter. Demnach bildet sich hier die jeweilige Verdopplung der Bewässerungsmenge (min.  $0,6 \text{ l/m}^2/\text{d}$  auf mean.  $1,2 \text{ l/m}^2/\text{d}$  auf max.  $2,4 \text{ l/m}^2/\text{d}$  in den trockenen Sommermonaten analog ab.

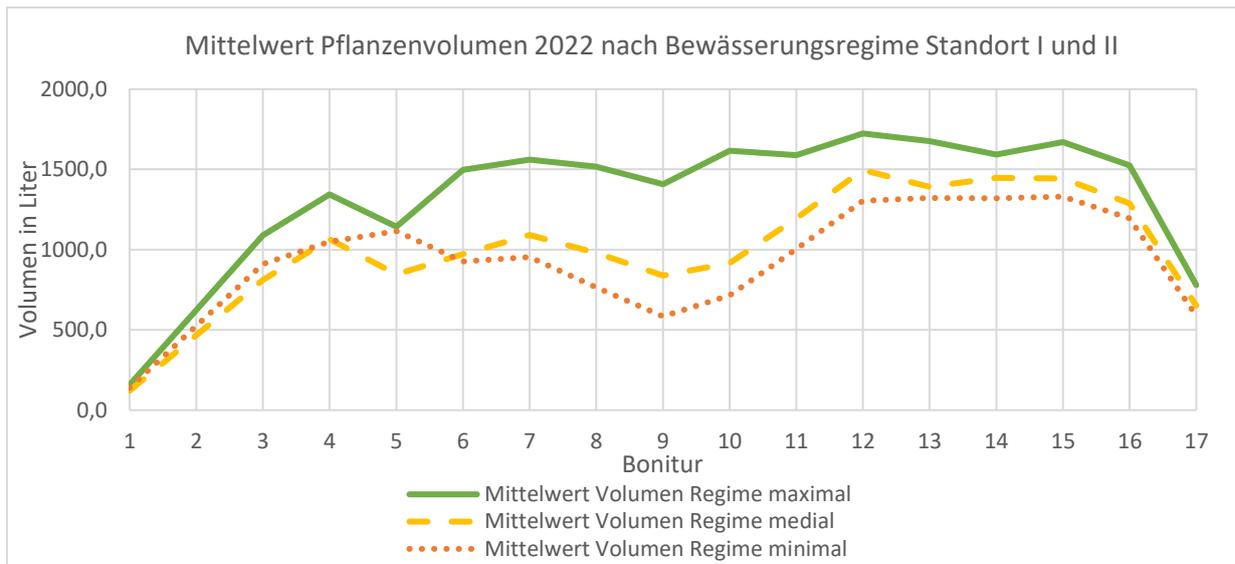


Abbildung 4.3-30: Mittlere Pflanzenvolumina ermittelt aus *Bistorta* und *Geranium* in 2022 in den Standort I und II.

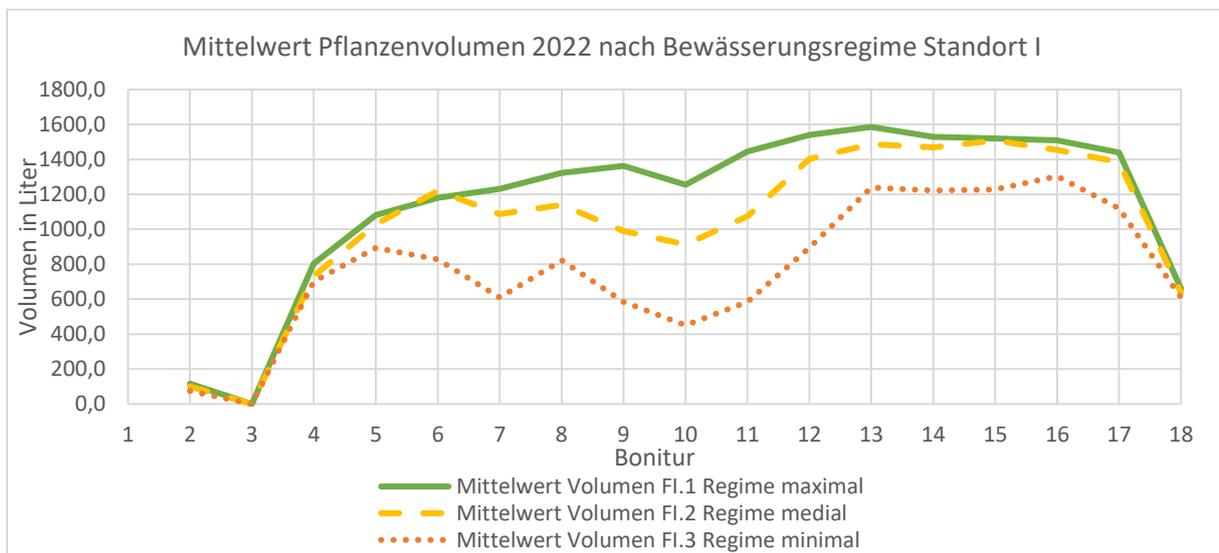


Abbildung 4.3-31: Mittlere Pflanzenvolumina ermittelt aus *Bistorta* und *Geranium* in 2022 der Felder FI.1, FI.2 und FI.3.

Die Betrachtung der Felder FI.1, FI.2 und FI.3 veranschaulicht die unterschiedliche Entwicklung sehr deutlich (Abbildung 4.3-31). Bis zur Bonitur 22-04 (13. Mai 2022) entwickeln sich die Felder identisch. Ab Bonitur 22-05 (27. Mai 2022) bleibt das minimal bewässerte Feld FI.3 deutlich zurück. Zwischen Bonitur 22-07 und 22-15 (24. Juni und 30. September) fällt auch das medial bewässerte Feld gegenüber dem maximalen deutlich zurück. Das maximal bewässerte Feld zeigt die geringste Anfälligkeit für die extremen klimatischen Bedingungen in 2022.

Demnach zeigt sich der Effekt der anhaltenden Hitzeperiode zwischen Bonitur 22-06 bis 22-11 (10. Juni bis 19. August 2022) sehr deutlich. Zur Bonitur 22-07 (24. Juni 2022) zeigt das minimal bewässerte Feld bereits deutlich den Trockenstress optisch und volumetrisch an, während das medial bewässerte Feld noch stabil bleibt (Tabelle 4-10). Bei Bonitur 22-10 (05. August 2022) hat auch das medial bewässerte Feld optisch und volumetrisch deutlich abgenommen. Im letzten Drittel der Vegetationsperiode in Bonitur

22-14 (30. September 2022) schaffen es unter erhöhtem Niederschlag und sinkenden Temperaturen alle Felder sich optisch deutlich zu erholen und wieder an Pflanzenmasse zuzulegen. Der Kurvenverlauf der Felder I.1, I.2 und I.3 spiegelt jedoch insgesamt die tatsächlich eingesetzte Wassermenge nicht so deutlich wieder wie der Gesamtvergleich der beiden Standorte in Abbildung 4.3-30. Diese Abweichung könnte damit zusammenhängen, dass diese drei Felder etwas häufiger im Schlagschatten des Gebäudes liegen. Hier könnte erst über eine längere mit auf die Lichtverhältnisse fokussierten Messreihe einer Klärung erzielt werden.

*Tabelle 4-10: optischer und volumetrischer Vergleich der Felder Fl.1 (maximal bewässert), Fl.2 (medial bewässert) und Fl.3 (minimal bewässert) an drei Terminen 2022.*

| 18. Juni 2022 (22-07)  |        |       | 08. August 2022 (22-10)  |       |       | 30. September 2022 (22-14)   |        |        |
|--|--------|-------|--|-------|-------|--|--------|--------|
| Fl.1   | Fl.2   | Fl.3  | Fl.1   | Fl.2  | Fl.3  | Fl.1   | Fl.2   | Fl.3   |
| 12,3 L   | 10,9 L | 6,1 L | 12,6 L   | 9,1 L | 4,5 L | 15,3 L   | 14,7 L | 12,2 L |
|  |        |       |  |       |       |  |        |        |

#### 4.3.1.8. Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des hinsichtlich des Witterungsverlaufs sehr extremen Jahres 2022 zeigen deutlich, dass die Vitalität und Ästhetik Einfacher Intensivdachbegrünungen im Vergleich zu den geringer bzw. nicht bewässerten Referenzfeldern verbessert werden kann, je kontinuierlicher das Wasserdargebot im Bereich der maximalen Feldkapazität gehalten wird. Sämtliche ausgewerteten Parameter zeigen, dass die Pflanzen bei Bewässerung mit dem Maximalregime (Regime Maximal = 2,4 L/m<sup>2</sup>/d) trotz hoher Temperaturen sehr vital waren. Auch unter ästhetischen Gesichtspunkten erzielten die maximal bewässerten Felder unter Extrembedingungen die besten Ergebnisse. In der Auswertung wurde jedoch auch deutlich, dass keine Linearität zwischen Vitalität und Bewässerungsmenge besteht, sondern mit der medialen Bewässerung (Regime Medial = 1,2 L/m<sup>2</sup>/d) Bewertungen erzielt werden konnten, welche z.T. nur leicht hinter der maximalen Bewässerung zurücklagen. Selbst die Felder mit dem minimalen Bewässerungsregime (Regime Minimal = 0,6 L/m<sup>2</sup>/d) kann ganzjährig noch eine ein zufriedenstellendes Erscheinungsbild und artspezifisch eine sommerliche Blütenbildung erreicht werden.

Mit den erhöhten Bewässerungsmengen kann darüber hinaus die artspezifisch die Wuchshöhe, respektive das potentiell verdunstende Vegetationsvolumen gesteigert werden.

Erkennbare Auswirkungen der Bewässerung mit vorgefiltertem Grauwasser auf das Erscheinungsbild der Vegetation konnte bis zur Vegetationsperiode 2022 nicht festgestellt werden. Im späten Frühjahr 2023 kam es jedoch zu einem Ausfall eines größeren Teils der an Standort III gepflanzten Heuchera. Ursache könnte ein festgestellter Befall mit einem Dickmaulrüssler sein. Die Untersuchungen laufen derzeit.

#### 4.3.2. Pflegebedarf vitaler Dachflächen

*Hypothese: Auf regelmäßig bewässerten Einfachen Intensivbegrünungen wachsen weniger unerwünschte (konkurrenzstarke) Arten auf, die die sich negativ auf die Ästhetik und den Pflegeaufwand auswirken.*

##### 4.3.2.1. Arteneintrag

Die aufgewachsenen und eingetragenen Arten (Abbildung 4.3-32) sind in der jeweiligen Vegetationsperiode stabil auf bestimmte Arten beschränkt (Tabelle 4-11). Auffällig war in der ersten Hälfte der zweiten Vegetationsperiode das hohe Aufkommen von *Oxybasis glauca* und später *Erigeron canadensis*.

In der dritten Vegetationsperiode treten besonders häufig die Arten *Taraxacum officinalis*, *Sonchus asper* und *Cardamine hirsuta* auf. Einige Arten der vorangegangenen Vegetationsperioden wie *Clematis vitalba* oder *Atriplex prostrata* treten nicht mehr auf. Dafür etablierten sich andere Arten wie *Amaranthus caudatus* und *Galium aparine*.

Wie bereits in der ersten Vegetationsperiode ist das Austreiben von Beikräutern aus den Topfballen der im Frühjahr 2021 gepflanzten Individuen auffällig. Vorrangig sind *Poa annua* und *Origanum vulgare* vertreten.

Die Anzahl der aufwachsenden Arten unterscheidet sich zu Beginn der Vegetationsperiode 2022 bedingt durch die Bewässerungsregime merklich. In Abbildung 4.3-33 sind ab Bonitur 22-03 (29. April 2022) keine signifikanten Mengenunterschiede zwischen den Regimen mehr festzustellen. Die durch die unterschiedlichen Bewässerungsregime erzielten Deckungsgrade unterscheiden sich nicht stark genug, um den Aufwuchs merklich zu beeinflussen. Zudem unterbinden die stark steigenden Temperaturen ab Bonitur 22-06 (10. Juni 2022) das aufkeimen größerer Bestände.

Tabelle 4-11: Wild aufgewachsene Arten sortiert nach Jahr.

| 2021  | 2022   |  |
|---|--|--|
| <b>Gehölze:</b><br>Acer palmatum<br>Acer platanoides<br>Populus tremula   | <b>Gehölze:</b><br>Acer palmatum<br>Salix caprea   |  |
| Atriplex prostrata<br>Capsella bursa-pastoris<br>Cardamine hirsuta<br>Centranthus ruber<br>Clematis vitalba<br>Erigeron canadensis<br>Heuchera villosa<br>Lactuca serriola<br>Origanum vulgare<br>Oxybasis glauca<br>Poa annua<br>Portulaca oleracea<br>Salvia rosmarinus<br>Senecio vulgaris<br>Sonchus asper<br>Sonchus oleraceus<br>Sisymbrium altissimum<br>Taraxacum officinalis | Amaranthus caudatus<br>Allium schoenophrasum<br>Cardamine hirsuta<br>Centranthus ruber<br>Cerastium glomeratum<br>Crepis capillaris<br>Cyperus rotundus<br>Dianthus caryophyllus<br>Echinochloa crus-galli<br>Epilobium montanum<br>Epilobium parviflorum<br>Epilobium tetragonum<br>Erigeron canadensis<br>Euphorbia maculata<br>Galium aparine<br>Heuchera villosa<br>Lactuca serriola | Mentha arvensis<br>Mimulus ringens<br>Origanum vulgare<br>Oxalis corniculata<br>Oxalis stricta<br>Oxybasis glauca<br>Poa annua<br>Polygonum aviculare<br>Polygonum convolvulus<br>Scabiosa columbaria<br>Senecio vulgaris<br>Sonchus asper<br>Sonchus oleraceus<br>Stachys officinalis<br>Taraxacum officinalis<br>Veronica arvensis |

Über die gesamte Hitzeperiode bleibt das Aufkommen an unerwünschten Arten sehr gering. Mit Einsetzen der Niederschläge und den sinkenden Temperaturen kommt es in Bonitur 22-13 (16. September 2022) zu einem plötzlichen sehr starken Anstieg an aufwachsenden Arten. Bedingt durch die Reduzierung des Deckungsgrades in den medial und minimal bewässerten Feldern kommt es in besagten Bereichen zu einem ungleich stärkeren Aufwuchs. Durch die etwas langsamere Erholung der Pflanzung sinkt in der Folge die Anzahl der aufwachsenden Arten schnell ab. Jedoch verzeichnen die medial und minimal bewässerten Felder einen höheren Anteil an eingetragenen Arten. Dabei schneiden die minimal bewässerten Felder deutlich am schlechtesten ab. Zudem unterbinden die stark steigenden Temperaturen ab Bonitur 22-06 (10. Juni 2022) das aufkeimen größerer Bestände. Über die gesamte Hitzeperiode bleibt das Aufkommen an unerwünschten Arten sehr gering. Mit Einsetzen der Niederschläge und den sinkenden Temperaturen kommt es in Bonitur 22-13 (16. September 2022) zu einem plötzlichen sehr starken Anstieg an aufwachsenden Arten. Bedingt durch die Reduzierung des Deckungsgrades in den medial und minimal bewässerten Feldern kommt es in besagten Bereichen zu einem ungleich stärkeren Aufwuchs. Durch die etwas langsamere Erholung der Pflanzung sinkt in der Folge die Anzahl der aufwachsenden Arten schnell ab. Jedoch verzeichnen die medial und minimal bewässerten Felder einen höheren Anteil an eingetragenen Arten.



Abbildung 4.3-32: Zur Bestimmung entnommene Individuen 2,5 Monat nach Entnahme, von links oben nach rechts unten *Salvia rosmarinus*, *Acer palmatum*, *Acer platanoides*, *Heuchera villosa*, *Clematis vitalba*.

Dabei schneiden die minimal bewässerten Felder deutlich am schlechtesten ab. Zudem unterbinden die stark steigenden Temperaturen ab Bonitur 22-06 (10. Juni 2022) das aufkeimen größerer Bestände. Über die gesamte Hitzeperiode bleibt das Aufkommen an unerwünschten Arten sehr gering. Mit Einsetzen der Niederschläge und den sinkenden Temperaturen kommt es in Bonitur 22-13 (16. September 2022) zu einem plötzlichen sehr starken Anstieg an aufwachsenden Arten. Bedingt durch die Reduzierung des Deckungsgrades in den medial und minimal bewässerten Feldern kommt es in besagten Bereichen zu einem ungleich stärkeren Aufwuchs. Durch die etwas langsamere Erholung der Pflanzung sinkt in der Folge die Anzahl der aufwachsenden Arten schnell ab. Jedoch verzeichnen die medial und minimal bewässerten Felder einen höheren Anteil an eingetragenen Arten. Dabei schneiden die minimal bewässerten Felder deutlich am schlechtesten ab. Zudem unterbinden die stark steigenden Temperaturen ab Bonitur 22-06 (10. Juni 2022) das aufkeimen größerer Bestände. Über die gesamte Hitzeperiode bleibt das Aufkommen an unerwünschten Arten sehr gering. Mit Einsetzen der Niederschläge und den sinkenden Temperaturen kommt es in Bonitur 22-13 (16. September 2022) zu einem plötzlichen sehr starken Anstieg an aufwachsenden Arten. Bedingt durch die Reduzierung des Deckungsgrades in den medial und minimal bewässerten Feldern kommt es in besagten Bereichen zu einem ungleich stärkeren

Aufwuchs. Durch die etwas langsamere Erholung der Pflanzung sinkt in der Folge die Anzahl der aufwachsenden Arten schnell ab. Jedoch verzeichnen die medial und minimal bewässerten Felder einen höheren Anteil an eingetragenen Arten. Dabei schneiden die minimal bewässerten Felder deutlich am schlechtesten ab. Zudem unterbinden die stark steigenden Temperaturen ab Bonitur 22-06 (10. Juni 2022) das aufkeimen größerer Bestände. Über die gesamte Hitzeperiode bleibt das Aufkommen an unerwünschten Arten sehr gering. Mit Einsetzen der Niederschläge und den sinkenden Temperaturen kommt es in Bonitur 22-13 (16. September 2022) zu einem plötzlichen sehr starken Anstieg an aufwachsenden Arten. Bedingt durch die Reduzierung des Deckungsgrades in den medial und minimal bewässerten Feldern kommt es in besagten Bereichen zu einem ungleich stärkeren Aufwuchs. Durch die etwas langsamere Erholung der Pflanzung sinkt in der Folge die Anzahl der aufwachsenden Arten schnell ab. Jedoch verzeichnen die medial und minimal bewässerten Felder einen höheren Anteil an eingetragenen Arten. Dabei schneiden die minimal bewässerten Felder deutlich am schlechtesten ab. Die maximale Bewässerung hat somit einen sehr klaren Effekt auf das Unterdrücken unerwünschter Arten durch signifikant vitalere Pflanzen, welche durchgängig einen höheren Deckungsgrad erzielen können.

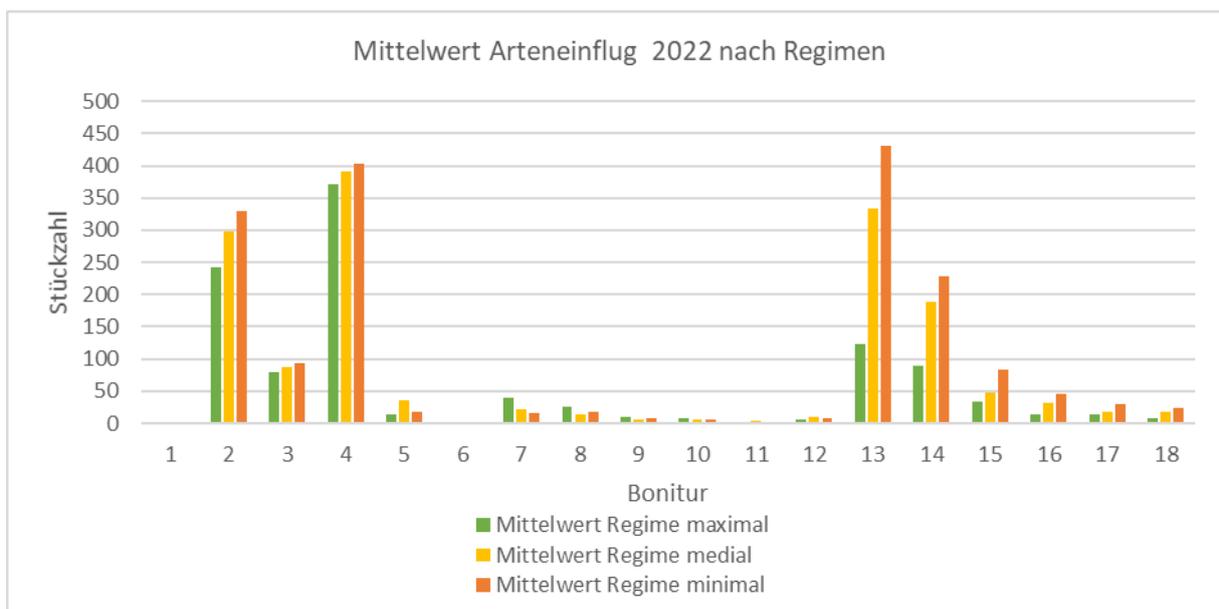


Abbildung 4.3-33: Vergleich des Arteneinflugs 2022 in allen Feldern nach Bewässerungsregime.

#### *4.3.2.2. Bewertung der Ergebnisse*

Besonders durch den durch Trockenstress provozierten Rückgang des Deckungsgrades in den Sommermonaten 2022, kam es in den medial und minimal bewässerten Feldern zu einem extremen Aufkommen an unerwünschten Arten. Dies hatte einen stark gesteigerten Pflegeaufwand zur Folge, welcher durch den konstant hohen Deckungsgrad in den maximal bewässerten Feldern vermieden werden konnte.

Die weniger eindeutigen Unterschiede des Aufkommens unerwünschter Arten im Frühjahr 2022 bei milden Temperaturen und noch relativ ähnlichen Deckungsgraden zwischen den verschiedenen Bewässerungsregimen lässt den Rückschluss zu, dass sich der zusätzliche Pflegeaufwand bei weniger extremen klimatischen Bedingungen abhängig vom jeweiligen Deckungsgrad verhält.

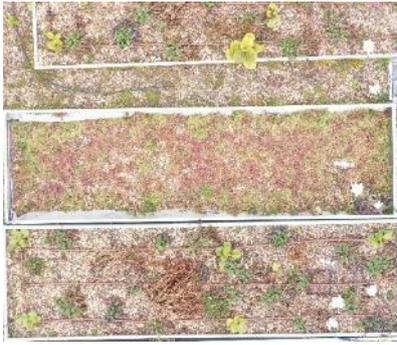
#### *4.3.3. Weitere Auswertungen*

##### *4.3.3.1. Bewertung der extensiven Dachbegrünung*

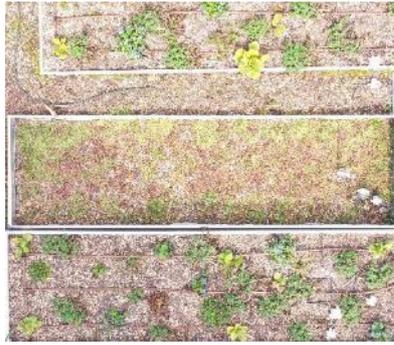
Das Referenzfeld Fl.4 wurde 2021 mit einer Extensivbegrünung aus Sedumsprossen begrünt. Der Aufbau des Gründaches ist weitestgehend mit den anderen Forschungsfeldern identisch, mit dem Unterschied, dass die Substratstärke mit 10 cm nur die Hälfte der Stärke aufweist. Das Feld wird nicht bewässert.

Wie Abbildung 4.3-34 zeigt, entwickelt sich die Vegetation aus Sedum zu Beginn der Aufnahmen erwartungsgemäß. Die Pflanzen sind vital, was maßgeblich an den grünen Pflanzenbestandteilen erkennbar ist. Die erste Hitzeperiode im Juni 2022 spiegelt sich in einer leichten Gelbfärbung in Bonitur 22-07 am 24. Juni 2022 wieder. Die Pflanzen erholen sich jedoch in Teilen rasch als die Temperaturen Anfang Juni kurzzeitig stark bis unter 20°C fallen. Die darauffolgende 5-wöchige (38 Tage) Periode mit lediglich vier Tagen unter 25 °C, führt zunächst zu einer starken Gelbfärbung (Bonitur 22-09 am 22. Juli 2022) und schließlich zum nahezu vollständigen Einziehen der Pflanzen (Bonitur 22-10 am 05. August 2022). Mit erneut sinkenden Temperaturen und auftretenden Niederschlägen Ende August, regeneriert die Vegetation zügig und treibt erneut aus.

Die als sehr trockenheitsresistent bekannten Sedumarten überstehen demnach selbst einen extremen Sommer wie 2022, sind in den heißen, trockenen Perioden jedoch kaum vital und zeigen in diesem Zustand nur geringe Kühlungseffekte.



*Bonitur 22-01, 01.04.22*



*Bonitur 22-02, 15.04.22*



*Bonitur 22-03, 29.04.22*



*Bonitur 22-04, 13.05.22*



*Bonitur 22-05, 27.05.22*



*Bonitur 22-06, 10.06.22*



*Bonitur 22-07, 24.06.22*



*Bonitur 22-08, 08.07.22*



*Bonitur 22-09, 22.07.22*



*Bonitur 22-10, 05.08.22*



*Bonitur 22-11, 19.08.22*



*Bonitur 22-12, 02.09.22*

*Abbildung 4.3-34: Bildvergleich der Drohnenaufnahmen des Forschungsfeldes FI.4 (Mitte, unbewässert, Extensivbegrünung). Ab Bonitur 22-12 wurden lediglich geringe Unterschiede festgestellt, daher sind diese hier nicht dargestellt.*

#### 4.3.3.2. Bewertung der Nebenflächen

Die Grundbegrünung der Nebenflächen, die analog zu den bewässerten Forschungsfeldern mit einer Gesamsubstratstärke von 20 cm ausgestattet sind, ist als Mischpflanzung mit Leit-, Begleit- und Füllstauden und -gräsern angelegt. Diese Flächen werden nicht bewässert. In der Artenzusammensetzung wurde das zu erwartende geringe natürliche Wasserdargebot berücksichtigt und mit einer überwiegend trockenheitsverträglichen Artenwahl beantwortet. Die eingesetzten Arten weisen demnach zu einem großen Teil Lebensbereiche des Freilands mit trockenen Standorten oder auch Steinlagen mit tendenziell nährstoffarmen Böden auf und entstammen zu einem großen Teil Listen mit empfohlener Eignung für eine nicht bewässerte einfache Intensivdachbegrünung. Die Flächen entwickelten sich bis zur Bonitur 22-05 (27. Mai 2022) sehr gut (Abbildung 4.3-35). Die Pflanzung ist bis zu diesem Zeitpunkt als sehr vital einzuschätzen. Die stark steigenden Temperaturen und geringen Niederschläge im Juni 2022 führen zu erheblichem Trockenstress der Pflanzen. Ab Bonitur 22-07 (24. Juni 2022) sind bereits erhebliche Reaktionen der Pflanzen auf die klimatische Extremsituation zu beobachten. Ein Großteil der Pflanzen reagiert mutmaßlich mit frühzeitigem Einziehen. In den folgenden Bonituren ist ein Fortschreiten der Reaktionen auf den anhaltenden Trockenstress zu sehen. Erst mit den allmählich sinkenden Temperaturen und einsetzenden Niederschlägen Ende August 2022 ist ein erneutes Austreiben einiger Pflanzen wie beispielsweise *Allium schoenoprasum* ‚Forescate‘ zu beobachten. Größtenteils ist das grünere Gesamtbild in Bonitur 22-13 (16. September 2022) jedoch auf das Austreiben von Saatgut anderer Arten zurückzuführen. Der Unterschied in Vitalität und Ästhetik zwischen den als trockenheitsliebend geltenden Arten in den unbewässerten Nebenflächen zu den bewässerten Pflanzen in den Forschungsfeldern ist als sehr hoch einzuschätzen. Der Luftbildvergleich der Nebenflächen in Abbildung 4.3-36 verdeutlicht dieses anschaulich. Die eingefügte Aufnahme vom 12. Juni 2023 zeigt, dass ein großer Teil der Bepflanzung im Folgejahr vollständig ausgefallen ist.



Bonitur 22-05, 27.05.22



Bonitur 22-07, 24.06.22



Bonitur 22-08, 08.07.22



Bonitur 22-09, 22.07.22



Bonitur 22-10, 05.08.22



Bonitur 22-11, 19.08.22



Bonitur 22-12, 02.09.22



Bonitur 22-13, 16.09.22

Abbildung 4.3-35: Bildvergleich ausgewählter Aufnahmen der unbewässerten Nebenflächen in 2022.



*Bonitur 22-07, 24. Juni 2022*



*Bonitur 22-15, 14. Oktober 2022*



*Bonitur 23-06, 12. Juni 2023*

*Abbildung 4.3-36: Vergleich der Entwicklung der Nebenflächen von Sommer 2022 bis Sommer 2023.*

## 5. Wasserbilanz, Stoffbilanz und Abflussprozesse (Arbeitspaket 3)

### 5.1. Wasserhaushalt

#### 5.1.1. Wasserversorgung

Als Grundlage für die Dimensionierung der Pflanzenkläranlage diente der Wasserverbrauch der Jahre 2017 – 2018 in den Sozialräumen des Botanischen Gartens. Dieser belief sich auf durchschnittlich 555 l/d. Unter der Annahme eines Grauwasseranteils von 80% wurde entsprechend ein Grauwasseraufkommen von 400 l/d abgeschätzt. Seit Inbetriebnahme der Pflanzenkläranlage im November 2019 werden die ausgeleiteten Grauwassermengen mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät registriert. Die in Abbildung 5.1-1 gegenübergestellten täglichen Durchflüsse zeigen, dass die erwarteten Grauwassermengen bisher kaum erreicht wurden. Seit August 2021 liegt der Grauwasseranfall kontinuierlich unter 100 l/d (s. Abbildung 5.1-1, links). Im Mittel fielen im Untersuchungszeitraum 85 Liter Grauwasser pro Tag an. Diese Wassermenge war größtenteils für das gewählte Bewässerungsregime ausreichend bzw. konnten temporäre Defizite durch die Zwischenspeicherung ausgeglichen werden. Dabei fiel ein systematischer Unterschied in den Abflussmessungen zwischen Ausleitung aus dem Gebäude und Zulauf zur Pflanzenkläranlage auf (Abbildung 5.1-1, rechts). Die Wassermengen, die der Pflanzenkläranlage zugeführt wurden, liegen dabei 20% über den Ausleitungen. Der Zustrom von Regen und Sickerwasser in den Speicherbehälter oder systematische Fehler der Messgeräte könnten die Unterschiede verursachen.

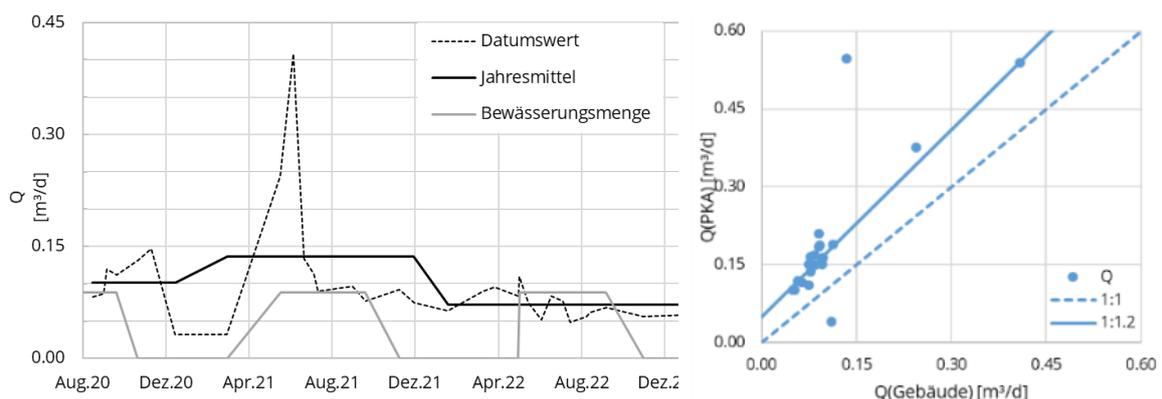


Abbildung 5.1-1: Verlauf der anfallenden Grauwassermengen im Projektzeitraum (links) und der ausgeleiteten Grauwassermengen aus dem Gebäude ( $Q(\text{Gebäude})$ ) und Zulauf zur Pflanzenkläranlage ( $Q(\text{PKA})$ ) nach Installation des Bewässerungssystems (rechts).

Zu- und Ablaufmessung ermöglichen eine Bilanzierung der Wassermengen in der Pflanzenkläranlage. Die vollständige Wasserbilanz kann in Kombination mit dem Niederschlag und mit der Verdunstung als Restglied aufgestellt werden. In Abbildung

5.1-2 ist die monatliche Wasserbilanz im Zeitraum April 2021 – August 2022 dargestellt. Der kurzfristig erhöhte Abwasseranfall im Mai 2021 führt in den folgenden beiden Monaten zu vermehrter Abwasserbehandlung. In längeren Trockenperioden (August – Oktober 2021, März – Juli 2022) vermindert die Verdunstung teilweise erheblich den Abfluss aus der Pflanzenkläranlage. Im Juli 2022 verdunsteten sogar mehr als 50 % des Zulaufs. Während auch diese Verdunstung für das Umgebungsklima wirksam wird, vermindert es die für Bewässerung verfügbare Wassermenge in Phasen, die für die Bewässerung kritisch sind.

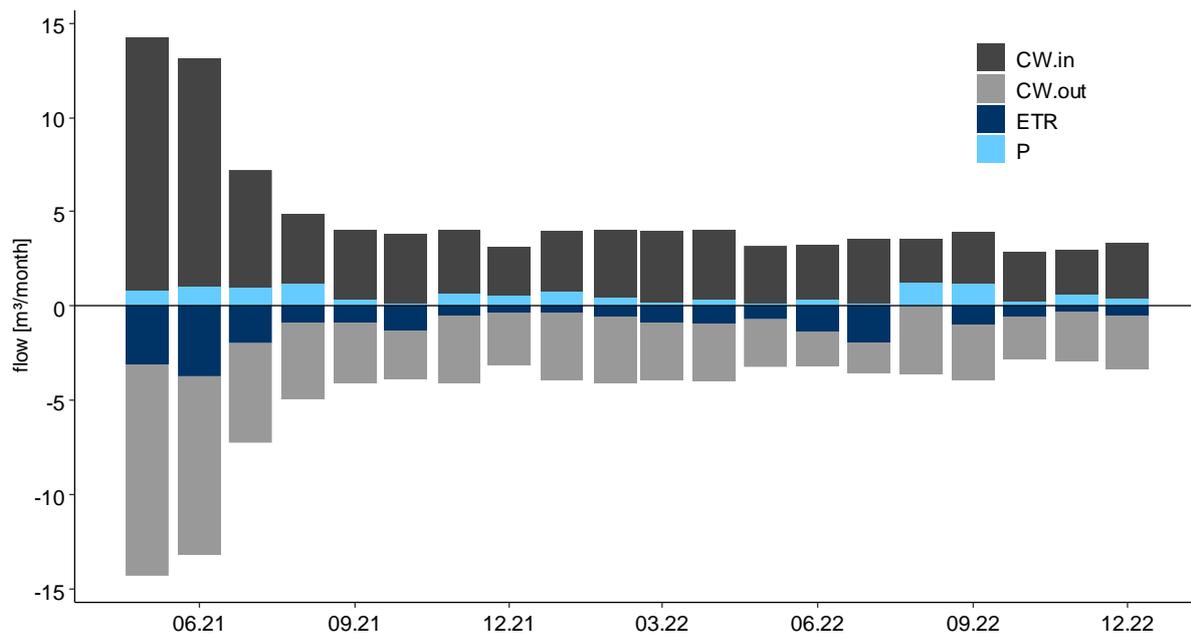


Abbildung 5.1-2: Wasserbilanz der Pflanzenkläranlage im Zeitraum April 2021 – Dezember 2022 mit den Bilanzkomponenten Zufluss (CW.in), Abfluss (CW.out), Niederschlag (P) und Verdunstung (ETR).

Im Zeitraum der Bewässerung 2021 wurden durch die Pflanzenkläranlage 42 m³ Wasser aufbereitet, in der bisherigen Bewässerungsperiode 2022 konnten dagegen nur 14,4 m³ Wasser bereitgestellt werden.

### 5.1.2. Bewässerung

Seit Juni 2021 findet während der Sommer und Herbstmonate eine systematische Bewässerung der Messfelder statt. Die Bewässerung erfolgt vollautomatisiert, wobei in der Vegetationsperiode 2021 eine zeitliche Steuerung hinterlegt wurde. Das Messsystem bietet darüber hinaus die Möglichkeit einer wertegesteuerten Bewässerung (z.B. über Bodenfeuchte oder Temperatur). Da die Bodenfeuchtemessung noch nicht zuverlässig funktioniert, wurde eine zeitliche Bewässerungssteuerung gewählt. Dabei wurden drei verschiedene Bewässerungsregime (maximal, medial, minimal) programmiert. Die Messfelder wurden mit jeweils der identischen Wassermenge (17 L je Bewässerung), aber nach einem unterschiedlichen Bewässerungszyklus versorgt. Die maximal bewässerten Felder erhielten alle 2 Tage, die medial alle 4 Tage und die minimal alle 8 Tage Bewässerungsgaben. Die Bewässerung erfolgte an versetzten Tagen, um das aufbereitete

Grauwasser möglichst gleichmäßig zu entnehmen (Tabelle 5-1). Die Messfelder wurden zudem in den Morgenstunden bewässert, um den Wasserspeicher in den Forschungsfeldern vor dem Anstieg der Verdunstungsleistung der Pflanzen im Tagesverlauf zu füllen.

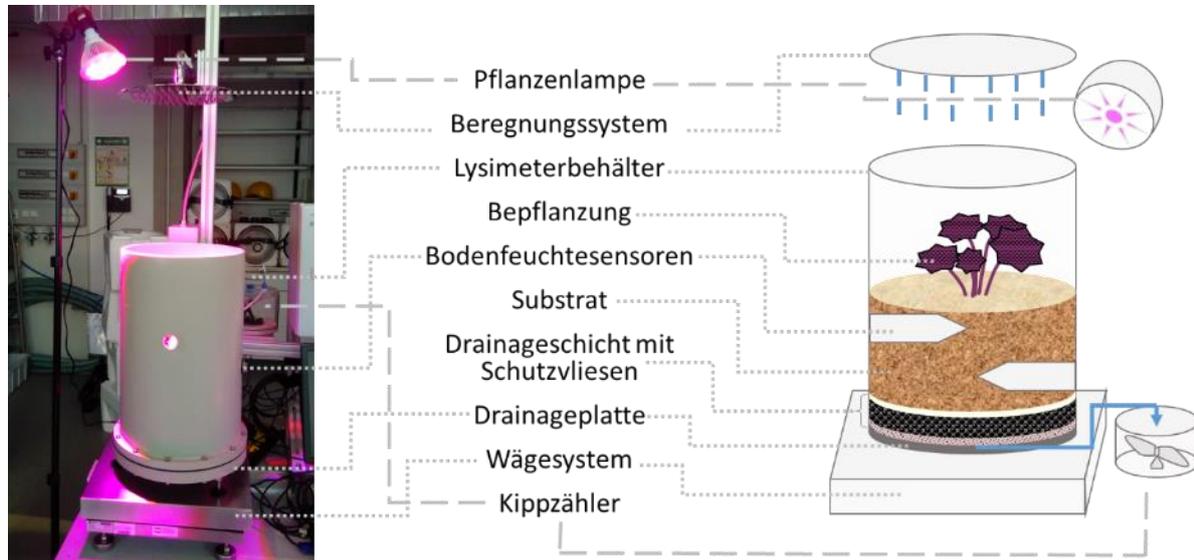


Abbildung 5.1-3: Fotografische und schematische Darstellung des Laborlysimeterversuchs.

Die Festlegung der Bewässerungsmengen und -zyklen erfolgte auf Basis von Ergebnissen aus Laborversuchen. In den Laborversuchen wurde der Gründachaufbau inkl. Bepflanzung (hier: Purpurglöckchen) in zwei Laborlysimetern nachgestellt (Abbildung 5.1-3). In Langzeitversuchen über mehrere Monate wurden die beiden Laborlysimeter unterschiedlichen Bewässerungsstrategien ausgesetzt. Dabei wurde der Wasserhaushalt und die Pflanzenentwicklung untersucht. Für die Bewässerungsstrategien des Gründachs wurden die Bewässerungsmengen aus den Laborversuchen hochgerechnet.

Die Auswertung der Ablaufdaten der Bewässerungsperiode 2021 ergab, dass insbesondere in den maximal bewässerten Feldern durch die Bewässerung öfter Ablauf generiert wurde. Da der Sommer 2021 niederschlagsreich war, war der Boden zeitweise vom Regen gesättigt, sodass das Bewässerungswasser nicht mehr aufgenommen werden konnte (Kapitel 7.2 Analyse der stationären Klimamessung). Da ablaufendes Wasser weder ein Zugewinn für die Pflanzen noch für das Kühlungspotential darstellt, wurden die Wassermengen je Bewässerungsgabe für den Sommer 2022 halbiert (8,5 l je Bewässerung), die Häufigkeit der Bewässerung jedoch erhöht, sodass die Wassermenge in Summe gleich bleibt (Tabelle 5-1). Durch die häufigere Bewässerung mit kleineren Mengen, wird das Bodensubstrat nicht übersättigt. Das Wasser steht somit den Pflanzen zur Verfügung statt abzulaufen. Die Bewässerungsregimes wurden in den jeweiligen Forschungsfeldern beibehalten, da die langfristigen Auswirkungen der unterschiedlichen Bewässerung auf die Bepflanzung und Verdunstungsleistung untersucht werden sollen.

Tabelle 5-1: Bewässerungspläne für das Sommerhalbjahr 2021 und 2022.

| Bewässerungsplan 2021 |          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |
|-----------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Regime                | Frequenz | Tag 1 | Tag 2 | Tag 3 | Tag 4 | Tag 5 | Tag 6 | Tag 7 | Tag 8 | Tag 9 | Tag 10 | Tag 11 | Tag 12 |
| maximal               | 2 d      | x     |       | x     |       | x     |       | x     |       | x     |        | x      |        |
| medial                | 4 d      |       | X     |       |       |       | x     |       |       |       | x      |        |        |
| minimal               | 8 d      |       |       |       | x     |       |       |       |       |       |        |        | X      |

| Bewässerungsplan 2022 |          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |
|-----------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Regime                | Frequenz | Tag 1 | Tag 2 | Tag 3 | Tag 4 | Tag 5 | Tag 6 | Tag 7 | Tag 8 | Tag 9 | Tag 10 | Tag 11 | Tag 12 |
| maximal               | 1 d      | x     | X     | x     | x     | x     | x     | x     | X     | x     | x      | x      | X      |
| medial                | 2 d      | x     |       | x     |       | x     |       | x     |       | x     |        | x      |        |
| minimal               | 4 d      |       | X     |       |       |       | x     |       |       |       | x      |        |        |

Die neue Bewässerungsstrategie und die trockene Wetterlage 2022 führten dazu, dass in Trockenperioden nahezu das gesamte Bewässerungswasser im Substrat zurückgehalten wurde und Ablauf nur in Folge von Niederschlagsereignissen generiert wurde. Das Bewässerungswasser stand damit für die Verdunstung zur Verfügung.

Abbildung 5.1-4 dokumentiert die Abläufe aus den Forschungsfeldern FI.1 bis FI.3 für die ersten zehn Tage im August 2022. In dieser Zeit gab es lediglich am 05.08.22 bei Feld FI.3 (minimal bewässert) ein geringes Ablaufereignis (Ablaufvolumen 40 ml), das durch Bewässerung bedingt ist. Dass das minimal bewässerte Feld Ablauf zeigt, ist ungewöhnlich. Eine mögliche Ursache ist eine Kurzschlussströmung im Substrat, die durch die lange Trockenphase begünstigt wurde.

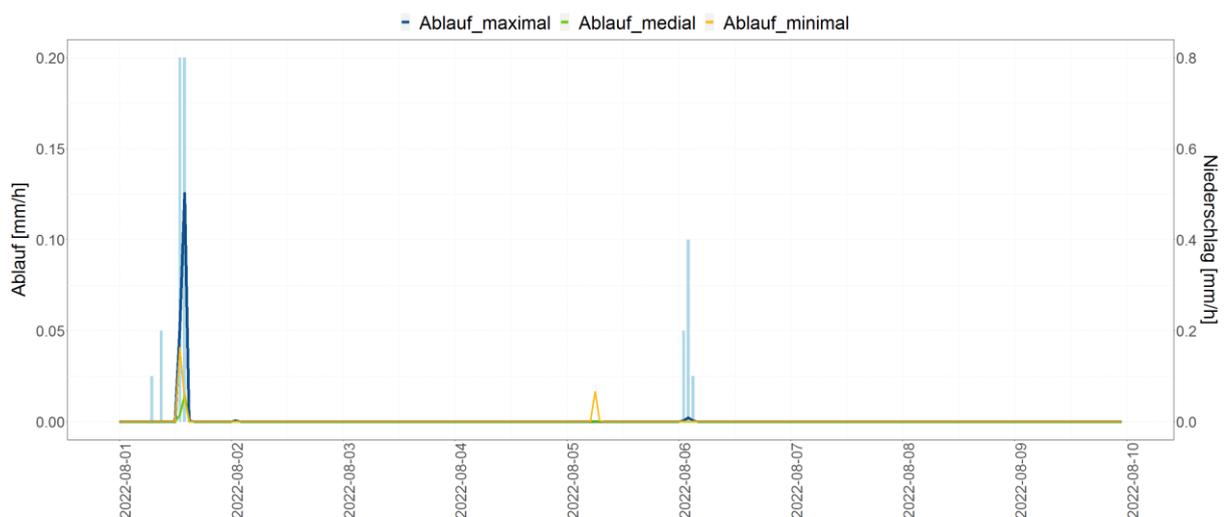


Abbildung 5.1-4: Niederschlag und Abläufe aus den Kippzählermessungen (Forschungsfelder FI.1 – maximal, FI.2 – medial, FI.3 – minimal) von 01. – 10.08.22.

Der Effekt der unterschiedlichen Bewässerungsregime auf den Ablauf ist in Abbildung 5.1-5 am Beispiel der Forschungsfelder FI.1 bis FI.3 dargestellt. Auf eine lange Trockenphase folgen Ende August mehrere starke Niederschlagsereignisse, die zu Ablauf

an den Messfeldern führen. Dabei wird deutlich, dass die größte Ablaufmenge bei maximaler Bewässerung auftritt. Die geringsten Abläufe entstehen im minimal bewässerten Messfeld. Eine häufigere Bewässerung führt zu einer höheren Wasserverfügbarkeit für Pflanzen und Verdunstung in trockenen Phasen, senkt aber das Wasserrückhaltepotential für Regenereignisse, da eine höhere Vorfeuchte im Substrat vorhanden ist.

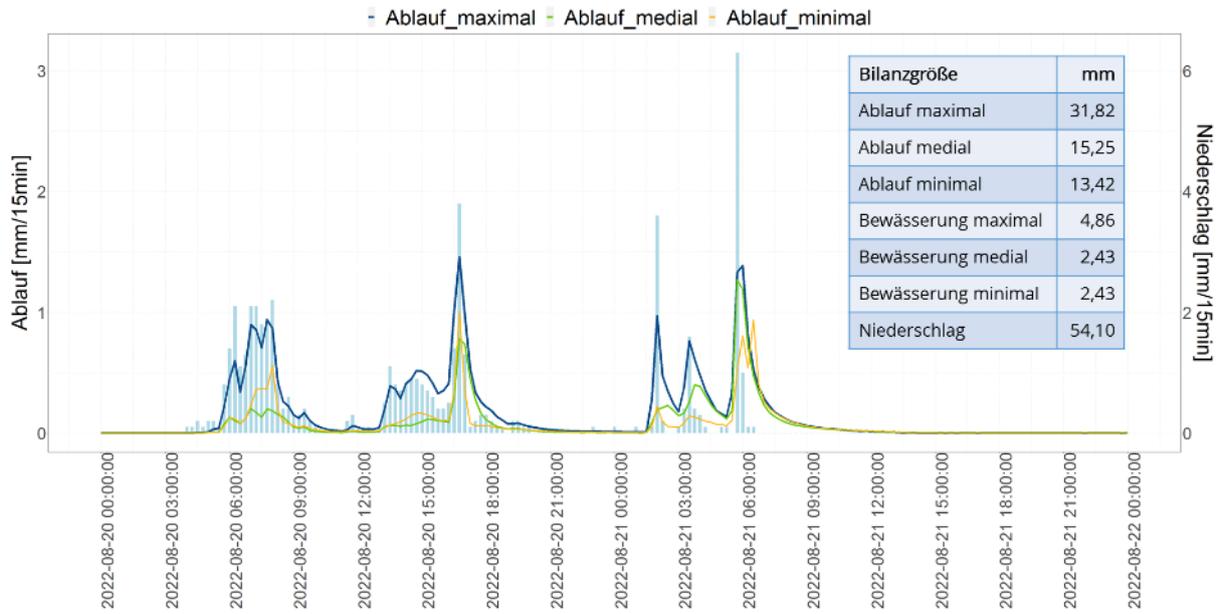


Abbildung 5.1-5: Niederschlag und Abläufe aus den Kippzählermessungen (Forschungsfelder Fl.1 – maximal, Fl.2 – medial, Fl.3 – minimal) für mehrere aufeinander folgende Regenereignisse im Zeitraum 20. – 22.08.2022.

Die systematische Bewässerung startete im Jahr 2022 mit starker Verzögerung aufgrund von Undichtigkeiten im Bewässerungssystem. Aufgrund des ungewöhnlich trockenen Frühlings war der Bodenspeicher, der als Puffer für die Pflanzen über Trockenperioden dienen kann, zu Beginn des Sommers kaum mit Wasser gefüllt. Da auch die Sommermonate 2022 extrem trocken waren, führte der verspätete Start der Bewässerung zu einer erheblichen Belastung der Bepflanzung.

Die ursprünglich geplante Steuerung der Bewässerung über die Bodenfeuchte konnte in der Messperiode 2022 nicht realisiert werden. Ursächlich ist die schlechte Vergleichbarkeit der Bodenfeuchtemessung zwischen den Messfeldern, die schwierige Dynamik des Messsignals und die damit einhergehenden komplexen Anforderungen an eine automatisierte Steuerung. Eine Steuerung der Bewässerung über die Bodenfeuchte wäre durch eine Anpassung des Steueralgorithmus möglich. Die Anpassung des Steueralgorithmus ist in der bestehenden Programmstruktur jedoch komplex und mit erhöhten Aufwendungen verbunden und aufgrund dessen vorerst nicht umsetzbar.

### 5.1.3. Wasserspeicherung im Dachsubstrat

Zur Messung der Bodenfeuchte wurden in den 21 Forschungsfeldern Stevens HydraProbes Professional installiert. Diese messen nach dem Prinzip der Coaxial Impedance Dielectric Reflectometry (CIDR). Das CIDR-Verfahren ist gegenüber anderen Bodenfeuchtemessverfahren wenig anfällig für äußere Störeinflüsse wie Temperaturschwankungen oder Schwankungen des Salzgehalts im Untergrund (Stevens 2018). Aus Änderungsraten der Bodenfeuchte kann die Speicheränderung  $\Delta S$  für die Wasserbilanz berechnet werden.

Die Messung der Bodenfeuchte im heterogenen Substrat erwies sich als kompliziert. Der Ziegelsplitt im Gründachsubstrat, der mitunter mehrere Zentimeter groß ist, kann zwischen den Messstäben verhaken. Da das Messvolumen klein ist, kann ein Stein zwischen den Sensorstäben die Messung erheblich beeinflussen und die Sensitivität auf Feuchteänderung reduzieren. Darüber hinaus begünstigen die groben Bestandteile des Substrats die Bildung von luftgefüllten Hohlräumen im Untergrund, die die Bodenfeuchtemessung ebenfalls negativ beeinflussen. Das ist kein ausschließliches Problem der CIDR-Sensoren, sondern ein generelles Problem in der Bodenfeuchtemessung. Um dennoch zuverlässige Bodenfeuchtemessergebnisse zu erhalten, wurden die HydraProbes in Gitterkörbe mit gesiebttem Substrat (< 1 cm) eingebaut. Die Körbe wurden anschließend im Messfeld eingegraben, wobei alle Körbe in gleicher Position im jeweiligen Messfeld und zur Tropferöffnung der Bewässerung eingebaut wurden, um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten. Das gesiebte Substrat bietet den Vorteil, dass die größeren Steine, die die Messung negativ beeinflussen, fehlen, hat jedoch den Nachteil, dass die Porengrößenverteilung und somit das Wasserhaltevermögen durch das Entfernen der Steine verändert wird. Nur ein Sensor ist im Ausgangssubstrat verblieben und dient als Referenz.

Da die Zusammensetzung des Substrats dennoch stark von natürlich gewachsenen Böden, in denen die HydraProbes üblicherweise eingesetzt werden, abweicht, ist eine Überprüfung der Standardkalibrierung und ggf. Anpassung der Kalibrierfunktion erforderlich. Sowohl für die Kalibrierung wie auch für die Optimierung der Bewässerung war es notwendig das Gründachsubstrat zu analysieren und wichtige Bodenparameter zu ermitteln. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Übersicht der Bodenparameter des Gründachsubstrats.

| Bodenparameter                                 | Einheit           | Mittelwert<br>Herstellerqualität | Mittelwert<br>gesiebt (< 2mm) | Anmerkung                  |
|--|-------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| <b>Trockenrohddichte</b>                       | g/cm <sup>3</sup> | 1,03                             | 0,98                          |                            |
| <b>Reindichte</b>                              | g/cm <sup>3</sup> | 2,40                             | 2,35                          | gemessen                   |
|  |                   | 2,43                             | -                             | berechnet                  |
| <b>Porosität</b>                               | %                 | 57,1                             | 58,4                          |                            |
| <b>Feldkapazität</b>                           | % WFV             | 40,1                             | -                             | Laborversuch, Massenbilanz |
|  |                   | 38,8                             | -                             | Laborversuch, Trockenofen  |
|  |                   | 37,3                             | -                             | Feldversuch, HydraProbes   |
|  |                   | 37,2                             | -                             | Feldversuch, Trockenofen   |
| <b>Anteil Grobbestandteile<br/>(&gt; 2 mm)</b> | %                 | 70,4                             | 0                             |                            |

Die Überprüfung der Kalibrierung der HydraProbes erfolgte über zwei unterschiedliche Methoden. Bei der ersten Variante wurde eine umfangreiche Bodenprobenahme-kampagne am Forschungsgründach durchgeführt. Dazu wurden in unterschiedlichen Messfeldern an mehreren Tagen Bodenproben entnommen. Aus den untersuchten Messfeldern wurden mehrere Proben in unterschiedlichen Abständen zum Tropfpunkt der Bewässerungsleitung entnommen. Die Beprobung fand außerdem bei unterschiedlicher Witterungslage statt, um ein breites Spektrum an Bodenfeuchten abzubilden. Die Proben wurden anschließend luftdicht ins Labor transportiert, gewogen, getrocknet und erneut gewogen. Aus den Gewichtsdaten wurde der gravimetrische Wassergehalt gemäß DIN 18121 berechnet. Durch Umrechnung in den volumetrischen Wassergehalt über die Trockenrohddichte des Substrats ist ein Vergleich der Labormessung mit der Feldmessung des HydraProbes möglich. Die Ergebnisse des Versuches waren indifferent und lieferten keine belastbare Aussage zur Güte der Kalibrierung.

Bei der zweiten Variante wurde die Messung der Bodenfeuchte im Gründachsubstrat im Labor nachgestellt. Dazu wurde ein Behälter mit gesiebttem Substrat befüllt und ein HydraProbe installiert. Der Behälter wurde auf einer Waage positioniert, um die Feuchtemessung mit einer Gewichtsmessung zu begleiten. Die Vorfeuchte des Substrats wurde gemäß DIN 18121 durch Trocknung ermittelt. Das Substrat wurde anschließend mit Wasser aufgesättigt. Der Trocknungsvorgang wurde durch Aufzeichnung des Gewichts und der Permittivität, die der HydraProbe erfasst und aus der die volumetrische Feuchte berechnet wird, begleitet. Der Versuch wurde mehrfach wiederholt (= Versuchsdurchlauf), wobei der HydraProbe mehrfach neu installiert wurde (= Versuchsreihe), um die Abhängigkeit der Bodenfeuchtemessung von der Einbausituation zu untersuchen.

Die Ergebnisse der Labormessung sind in Abbildung 5.1-6 dargestellt. Eine einheitliche Kalibrierung der Bodenfeuchtesensoren ist für das Substrat des Forschungsgründachs nicht möglich. Bedingt durch die Zusammensetzung des Substrats und das kleine Messvolumen des Sensors wird die Bodenfeuchtemessung durch die Einbausituation des

Sensors beeinflusst. Wenn keine Neupositionierung erfolgt, sind die Messungen reproduzierbar. Ein Neueinbau führt jedoch zu einer erheblichen Veränderung der Messdynamik. Eine Vergleichbarkeit der Messdaten der HydraProbes in den 21 Messfeldern des Gründachs ist somit nur bedingt zu erreichen. Folglich ist auch die Verwendbarkeit der Messdaten zur Verdunstungsberechnung und Wasserbilanzierung nur eingeschränkt möglich.

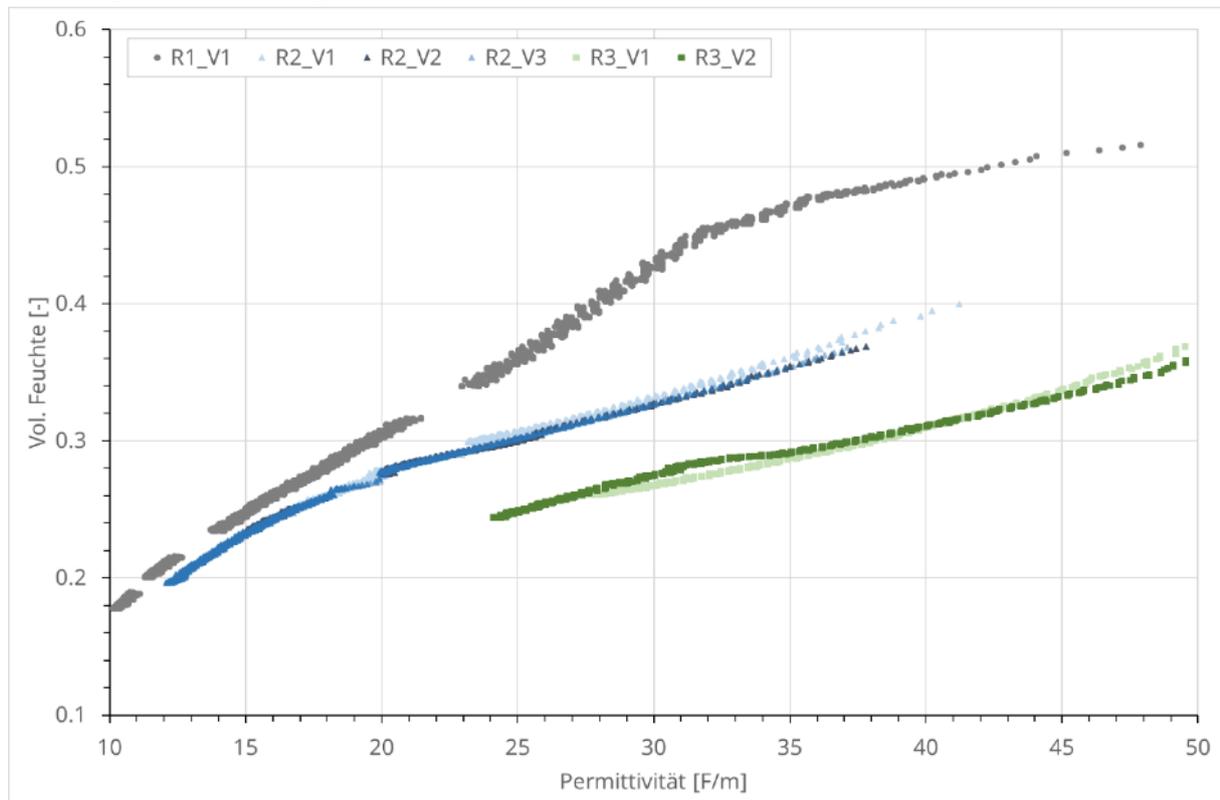


Abbildung 5.1-6: Im Labor ermittelte Kalibrierfunktionen für den HydraProbe-Sensor (R – Versuchsreihe, V – Versuchsdurchlauf).

Die in der Messsaison 2022 gesammelten Daten zur Bodenfeuchte legen außerdem nahe, dass sich die Bodenfeuchtemessung nach längeren Trockenphasen anders verhält als in feuchten Perioden. Grund hierfür kann die Textur des Bodens sein. In bzw. nach längeren Trockenphasen reagiert die Bodenfeuchtemessung kaum auf eine Wasserzufuhr. Die Messdynamik des Sensors ist somit örtlich und zeitlich veränderlich und hängt neben der Einbausituation auch stark von der Witterung ab. Diese Einflussfaktoren werden in ihrer Komplexität in vielen Modellvorstellungen (z.B. SWMM) nicht berücksichtigt.

Die Wasserspeicherung im Dachsubstrat kann neben der Bodenfeuchtemessung auch über die Gewichtsmessung der drei zum Lysimeter ausgebauten Messfelder ermittelt werden. Die Gewichtsdaten können darüber hinaus genutzt werden, um die aus der Bodenfeuchtemessung ermittelten Speicheränderungen zu überprüfen. Da die Lysimeter bis Juli 2022 fehlerhaft installiert waren, wies die Gewichtsmessung vor allem tagsüber große Messartefakte bedingt durch Strahlung und Wind auf. Die Gewichtsdaten in der Nacht lieferten zuverlässige Werte und können für weitere Berechnungen (z. B. tägliche

Wasserbilanz) herangezogen werden. Durch den Umbau der Lysimeter konnte die Gewichtsmessung deutlich verbessert werden, sodass seither auch die tagsüber erfassten Werte genutzt werden können.

Zur Überprüfung und Anpassung der Bodenfeuchtemesswerte über die Gewichtsdaten wurde zunächst das Trockengewicht des Substrats aus den Gewichtsdaten und den Bodenparametern (Tabelle 5-2) abgeleitet. Das Trockengewicht fällt für jedes Lysimeter leicht unterschiedlich aus, da die eingefüllte Substratmenge leicht voneinander abweicht. Über das Trockengewicht des Substrats wird die volumetrische Feuchteänderung, die durch eine bestimmte Wassermasse verursacht wird, abgeleitet (Tabelle 5-3). Über diesen Zusammenhang können die Bodenfeuchtedaten angepasst werden, sodass die Messdynamik zwischen den Forschungsfeldern vergleichbar wird.

*Tabelle 5-3: Trockengewicht des Substrats und volumetrische Bodenfeuchteänderung je 1 kg Masseänderung (Wasserzufuhr) für die Lysimeterfelder.*

|                       | Trockengewicht Substrat [kg] | Vol. Bodenfeuchteänderung je 1 kg Wasser [%] |
|-----------------------|------------------------------|--|
| <b>Lysimeter F1.1</b> | 669                          | 0.149  |
| <b>Lysimeter F1.2</b> | 698                          | 0.143  |
| <b>Lysimeter F1.3</b> | 684                          | 0.146  |

Die Transformation der Bodenfeuchte nach dem Gewicht erfolgte auf Grundlage der Messdaten des Winterhalbjahrs vom 19.11.21 bis 27.04.22. Der Zeitraum wurde so ausgewählt, dass bei Beginn eine weitgehende Aufsättigung des Substrates mit Wasser gewährleistet war und das Ende vor Beginn der Bewässerungsversuche lag. Dadurch kann davon ausgegangen werden, dass alle Forschungsfelder näherungsweise die gleiche Feuchteveränderung aufweisen und auch die Vegetationsentwicklung keinen großen Einfluss auf die Bodenfeuchte nimmt. Unterschiede in der Wassergehaltsmessung zwischen den Messfeldern können dadurch auf systematische Unterschiede in der Zusammensetzung und Wasserspeicherung des Messvolumens zurückgeführt werden. Über einen Abgleich mit den Gewichtsdaten ist es darüber hinaus möglich, die Sensorgemessenen Wassergehalte in eine lineare Beziehung mit den masse-basierten Wassergehalten zu setzen und entsprechend zu transformieren. Zur Gegenüberstellung der Daten wurden die Mittelwerte von 0 bis 1 Uhr nachts MEZ berechnet, da der gewählte Zeitraum vor dem Umbau der Lysimeter liegt und somit nur die Nachtdaten zuverlässig sind.

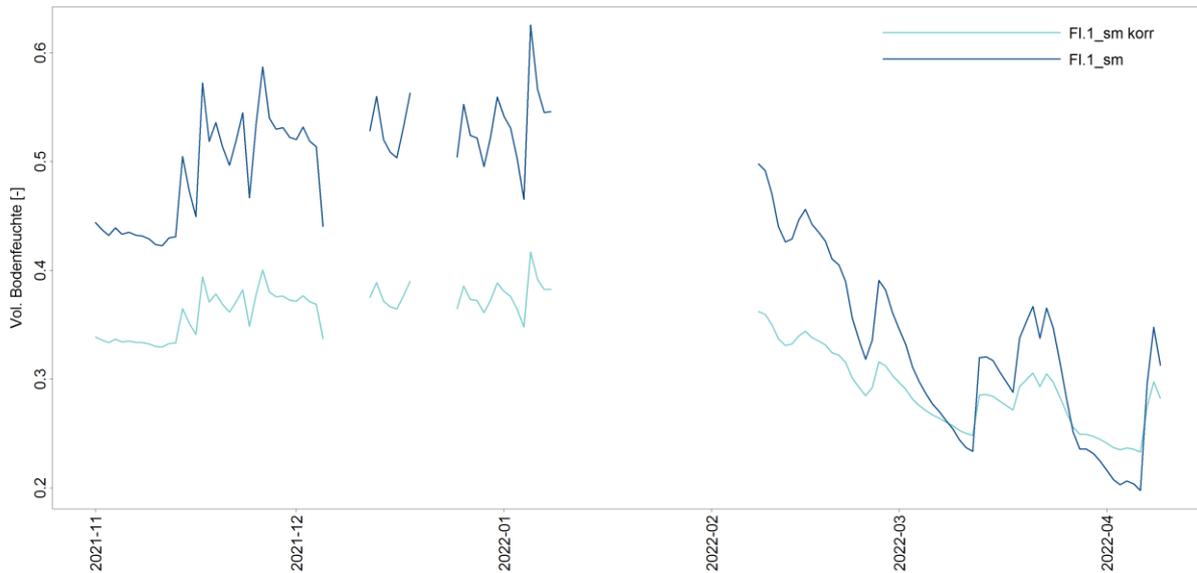


Abbildung 5.1-7: Volumetrische Bodenfeuchte des Forschungsfelds FI.1 im Winterhalbjahr 2021/22 vor (dunkelblau) und nach der Korrektur (hellblau) mit den Gewichtsdaten.

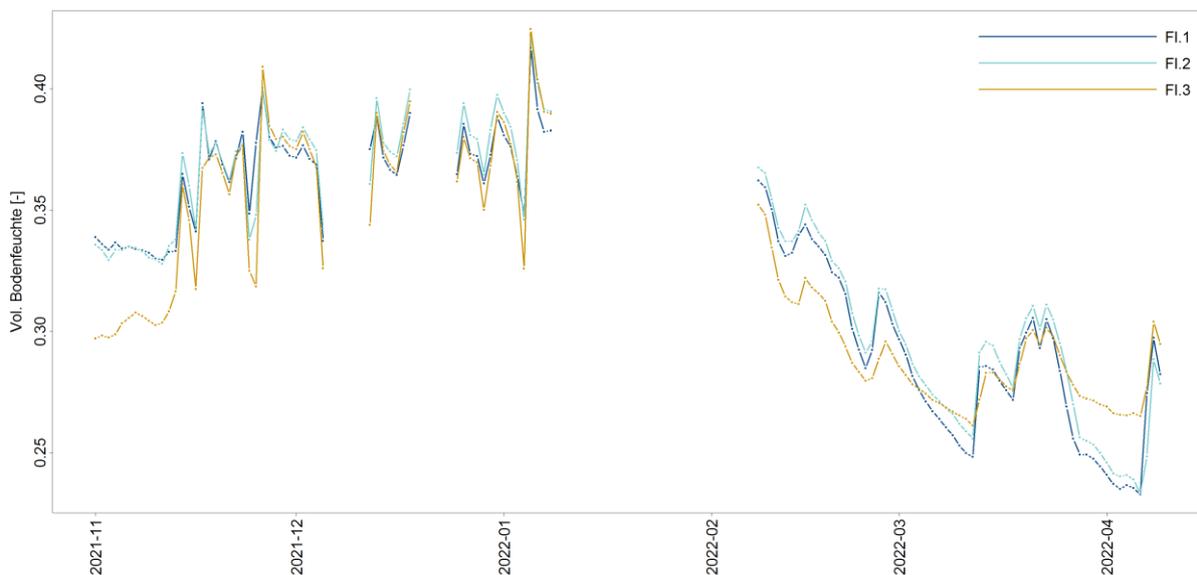


Abbildung 5.1-8: Über die Gewichtsdaten korrigierte volumetrische Bodenfeuchte der Forschungsfelder FI.1 bis FI.3 im Winterhalbjahr 2021/22.

Abbildung 5.1-7 zeigt die Bodenfeuchtedaten des Forschungsfelds FI.1 vor und nach der Korrektur. Die Bodenfeuchteänderungen fallen nach der Korrektur weniger dynamisch aus und die Kurve wurde tendenziell nach unten versetzt. Die Bodenfeuchtedaten lagen im Dezember und Januar vor der Korrektur deutlich über der Feldkapazität des Substrats von rund 40% (Tabelle 5-2). Die Feldkapazität des Bodens kann über längere Zeiträume niemals überschritten werden. Eine kurzzeitige Überschreitung ist möglich, wenn beispielsweise eine Feuchtefront am Sensor vorbeizieht. Die dauerhafte Überschreitung der Feldkapazität kann z. B. an einer ungünstigen, für das Forschungsfeld nicht repräsentativen Einbausituation liegen. Abbildung 5.1-8 zeigt die angepassten

Bodenfeuchtedaten für die Forschungsfelder FI.1, FI.2 und FI.3. Der Verlauf der Graphen ist ähnlich und auch die Feldkapazität wird nur kurzzeitig überschritten. Die Datenlücken im Diagramm sind auf Messausfälle und das Herausschneiden von inakkuraten Messdaten (z.B. in Frostperioden) zurückzuführen.

Für die anderen Forschungsfelder, die nicht als Lysimeter ausgestaltet sind, soll zukünftig eine Anpassung der Bodenfeuchtedaten über die transformierten Bodenfeuchtedaten der Lysimeterfelder stattfinden, wobei auch hier nur Daten aus dem Winterhalbjahr verwendet werden sollen, da nur dann die Bodenfeuchte in den Forschungsfeldern nicht von der Bewässerung beeinflusst und somit vergleichbar ist.

#### 5.1.4. Abfluss

Zur Ermittlung des Abflusses aus den Forschungsfeldern wurde an jedem der 21 Felder ein Ablaufbehälter mit CTD-Sonde (Fa. UIT) installiert. Die Ablaufbehälter verfügen über einen seitlichen Ablaufschlitz, sodass keine regelmäßige manuelle Entleerung erforderlich ist. Über die von der CTD-Sonde gemessene Wasserstandänderung kann der Abfluss aus dem Forschungsfeld  $Q_{zu,B}$  berechnet werden. Dazu wird die Volumenänderung im Ablaufbehälter  $Q_V$  und der Ablauf aus der Schlitzöffnung ermittelt  $Q_{ab,B}$  (Abbildung 5.1-9).

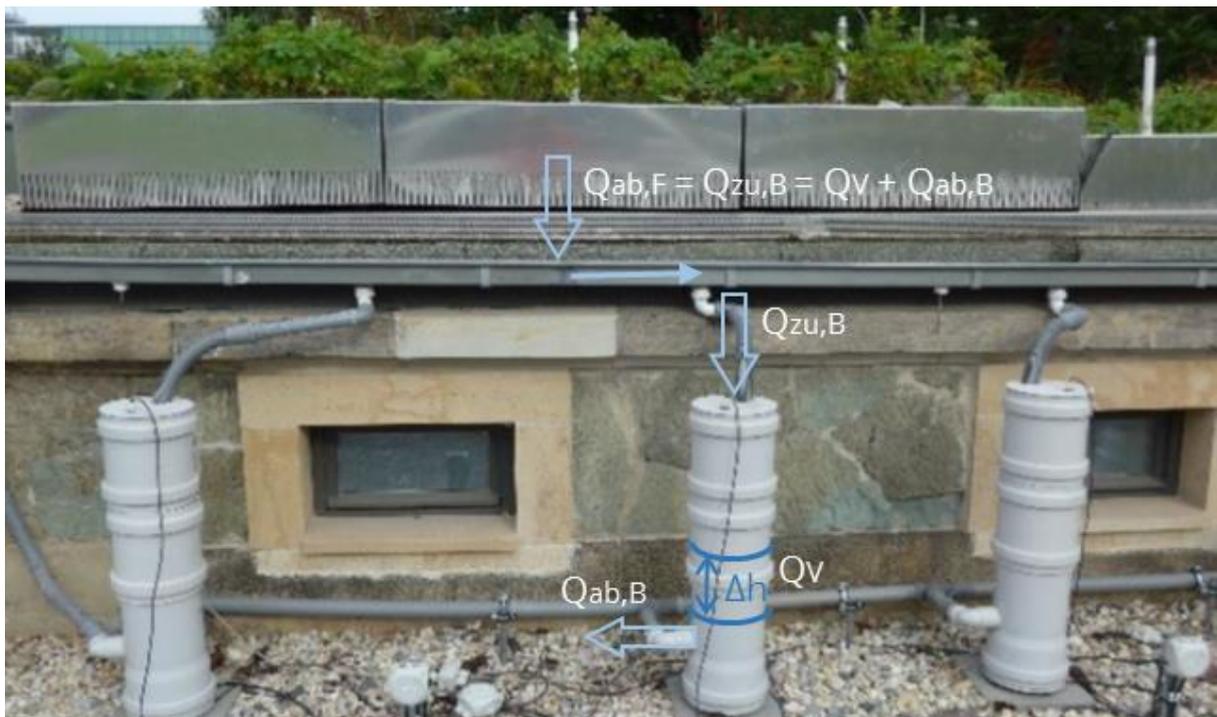


Abbildung 5.1-9: Darstellung der Volumenbilanz des Ablaufbehälters.

Die Volumenänderung im Behälter wird nach Formel (2) berechnet.

$$Q = \pi \cdot r^2 \cdot \Delta h / \Delta t \quad (2)$$

*r... Radius des Ablaufbehälters (100 mm)*

*Δh/Δt... Änderung des Wasserstands im Ablaufbehälter mit der Zeit*

Der Ablauf aus der Schlitzöffnung ergibt sich aus den nachfolgenden Formeln, wobei zwei Fälle unterschieden werden müssen. Formel (3), angelehnt an die Wehrformel nach POLENI, wird genutzt (BOLLRICH und PREIBLER (1996)), wenn der Wasserstand im Bereich des Ablaufschlitzes ist. Für den seltenen Fall der Überstauung des Ablaufschlitzes wird Formel (4) für den Ablauf aus einer hohen, schmalen Seitenöffnung (hier: Höhe 25 mm, Breite 4 mm) verwendet.

$$\text{Wenn } h_{\bar{u}} \leq a: \quad Q = m \cdot h_{\bar{u}}^n \quad (3)$$

$$\text{Wenn } h_{\bar{u}} > a: \quad Q = m \cdot (h_{\bar{u}}^n - (h_{\bar{u}} - a)^n) \quad (4)$$

*m... Ablaufkoeffizient*

*n... Ablaufexponent*

*h<sub>ū</sub>... Überfallhöhe bzw. Wasserstand (bezogen auf Unterkante Ablaufschlitz) [m]*

*a... Höhe des Auslaufschlitzes (25 mm) [m]*

$$\text{mit:} \quad m = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \quad (5)$$

*μ... Ablaufbeiwert [-]*

*g... Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]*

*b... Breite des Auslaufschlitzes (4 mm) [m]*

Da der Ablaufbeiwert  $\mu$  zwischen 0 und 1 liegen muss, muss der Ablaufkoeffizient  $m$  zwischen 0 und 0,0059 liegen. Laut ZANKE (2012) beträgt der Ablaufbeiwert  $\mu$  für eine hohe, schmale Seitenöffnung 0,65 bis 0,71, was einem Ablaufkoeffizient  $m$  von 0,0038 bis 0,0042 entspricht. Der Ablaufexponent  $n$  liegt laut Literatur bei 1,5.

Da am Forschungsgründach neben den CTD-Sonden auch drei Kippzähler (Fa. Seba) an den Lysimetermessfeldern vorhanden sind, können die mit den CTDs gemessenen Abläufe überprüft und der Ablaufkoeffizient  $m$  und -exponent  $n$  festgelegt werden.

Leider war es nicht möglich eine einheitliche Kalibrierung für die Wasserstands-Durchfluss-Beziehung der drei Lysimeterfelder zu finden. Selbst das Festlegen eines Ablaufkoeffizienten  $m$  und -exponenten  $n$  je Forschungsfeld ist nicht für jeden Ablaufbehälter möglich, da sich der Zusammenhang über den Messzeitraum von 2 Jahren scheinbar verändert. Aus physikalischer Sicht macht die zeitliche Variabilität keinen Sinn, da sich die Messbedingungen der Ablaufmessung nicht verändert haben. Eine mögliche Ursache für die Unterschiede in den Parametern liegt in den Freiheitsgraden des Gleichungssystems. Neben dem Exponenten  $n$  und Koeffizienten  $m$ , die festgelegt werden müssen, muss auch der Bezugswasserstand für die Überfallhöhe  $h_{\bar{u}}$  aus den Messdaten abgeschätzt werden. Der Bezugswasserstand ist über die Zeit veränderlich, da die CTD-

Sonde nicht fest im Behälter sitzt. Durch Berührungen des Behälters z.B. bei Reinigungsarbeiten oder durch Vibrationen am Behälter z.B. durch Wind, kann die Position der CTD-Sonde und damit der Bezugswasserstand verändert werden. Die Festlegung des Bezugswasserstands ist subjektiv und nicht eindeutig aus den Daten möglich.

In Abbildung 5.1-10 ist der Abfluss aus der Kippzählermessung und aus den Wasserstandsdaten nach der Kalibrierung im Forschungsfeld FI.2 dargestellt. Dafür wurden 19 Regenereignisse aus den Jahren 2021 und 2022 ausgewählt und aneinandergereiht. Mit einem Ablaufkoeffizienten  $m$  0,0034 und einem  $-$ exponenten  $n$  von 1,5 beträgt der RMSE 0,0204 L/min. Der Ablaufkoeffizient  $m$  liegt damit leicht unter dem zu erwartenden Wertebereich von 0,0038 bis 0,0042, der aus Literaturwerten für hohe, schmale Seitenöffnungen abgeleitet wurde. Für die Felder FI.1 und FI.3 konnte keine einheitliche Kalibrierfunktion bestimmt werden.

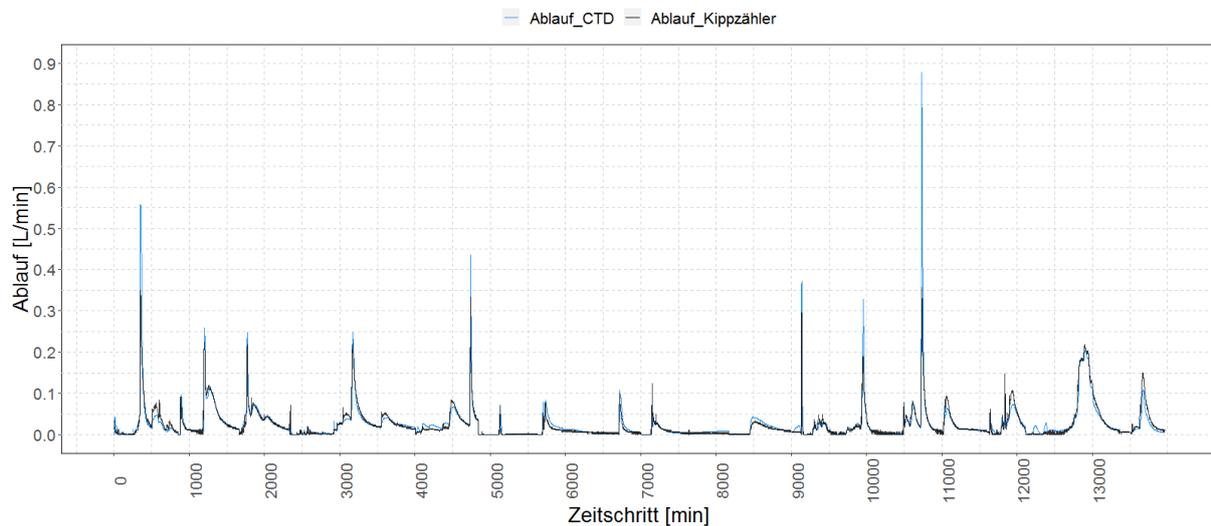


Abbildung 5.1-10: Gegenüberstellung von Abfluss aus den Kippzählermessungen und aus dem Wasserstand der CTD-Sonde ermittelt für 19 Regenereignisse im Zeitraum 2021/22 des Forschungsfeldes FI.2.

Untersuchungen an den Kippzählern haben gezeigt, dass Ablaufereignisse mit hoher Intensität systematisch unterschätzt werden. Ursächlich sind die Trägheit der Wippe und das Verspritzen von Wasser bei hohen Zuläufen zur Wippe. Entsprechend wird deutlich, dass bei vergleichbaren Projekten in Zukunft eine Korrekturfunktion für die Kippzähler notwendig wird.

### 5.1.5. Wasserbilanz und Verdunstung

Mit Hilfe der Messdaten des Forschungsgründachs wurde für ausgewählte Zeiträume und Forschungsfelder die Wasserbilanz aufgestellt und die reale Verdunstung  $ETR$  [mm/d] nach Gleichung (6) ermittelt.

$$ETR = P + I - R - \Delta S \quad (6)$$

$P$ ... Niederschlag [mm/d]

$I$ ... Bewässerung [mm/d]

$R$ ... Abfluss [mm/d]

$\Delta S$ ... Speicheränderung [mm/d]

In Abbildung 5.1-11 ist die tägliche Wasserbilanz des Forschungsfeldes FI.1 für August 2022 dargestellt. Niederschlag und Bewässerung stellen die positiven Terme der Bilanz dar, die einen Wassereintrag bedeuten. Abfluss und Verdunstung stellen negative Terme dar, die einen Wasserverlust bedeuten. Die Speicheränderung dient zum Schließen der Bilanz. Eine positive Speicheränderung im Diagramm bedeutet eine Wasserabgabe aus dem Substrat, eine negative Speicheränderung ein Auffüllen des Bodenwasserspeichers. Da dieses Forschungsfeld als Lysimeter ausgestaltet ist, wurde der Abfluss über die Kippzählermessung und die Speicheränderung aus der Gewichtsänderung bestimmt. Da der Niederschlagsmesser am Forschungsgründach die Niederschlagsmengen insgesamt unterschätzt, wurden für die Bilanz die Niederschlagsdaten der benachbarten Klimastation der Stadtentwässerung Dresden, die ebenfalls im Botanischen Garten Dresden installiert ist, verwendet. Bei den Kippzählerdaten erfolgte zudem eine Datenkorrektur, die Kurzschlussströmungen an der Dachhaut zwischen den drei untersuchten Feldern berücksichtigt.

In der ersten Monatshälfte verdunstet das täglich durch Bewässerung zugegebene Wasser komplett. Da es in dieser Zeit auch fast keine Speicheränderung gibt, kann davon ausgegangen werden, dass sich Bewässerung und Verdunstung in einem Gleichgewicht befinden. Bei defizitärer Bewässerung wäre eine Austrocknung (= positive Speicheränderung) in den Daten erkennbar gewesen. Bei zu hoher Bewässerung wäre Ablauf entstanden. Das maximale Bewässerungsregime konnte folglich die Bodenfeuchte auch in einer sehr trockenen Phase konstant halten. Ab Mitte August gab es mehrere Regenereignisse, die den Bodenspeicher aufgefüllt haben. Das Ereignis am 15.08. zeigt das Rückhaltevermögen des Substrats. Ein großer Teil des Niederschlags von ca. 20 mm/d wurde im Substrat gespeichert. Es wurde nur sehr wenig Ablauf gebildet. Auch beim Regenereignis am 21.08. wird ein hoher Wasseranteil im Substrat gespeichert. Bei den folgenden Regenereignissen ist der Bodenspeicher gesättigt, sodass ein großer Teil des Regenwassers abflusswirksam wird. Auffällig ist der positive Verdunstungsterm am 21.08. obwohl die Verdunstung in der Wasserbilanz einen Verlustterm darstellt. Ursächlich ist wahrscheinlich die Unterschätzung der Niederschlagsmenge an diesem Tag. Diese führte auch bei den Feldern FI.2 und FI.3 zu positiven Verdunstungstermen in der Wasserbilanz.

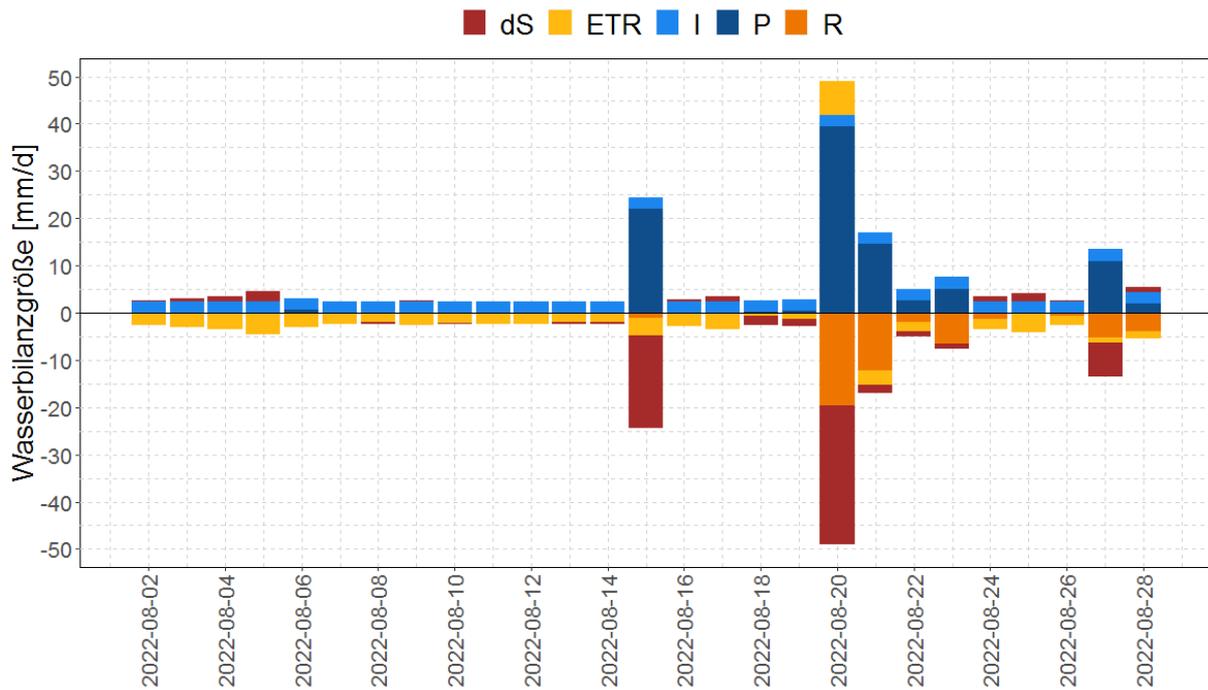


Abbildung 5.1-11: Wasserbilanz des Forschungsfeldes FI.1 für den Monat August 2022.

In Abbildung 5.1-12 ist vergleichend die tägliche reale Verdunstung der Forschungsfelder FI.1, FI.2 und FI.3 für den Monat August 2022 dargestellt. Die Verdunstung ist hier mit positivem Vorzeichen dargestellt. Negative Verdunstungswerte wurden herausgeschnitten und haben keinen Balken im Diagramm. Negative Verdunstungswerte sind auf verschiedene Messunsicherheiten und -fehler zurückzuführen.

Aus der Gegenüberstellung wird deutlich, dass die Verdunstung im maximal bewässerten Feld FI.1 mit im Mittel 2,41 mm/d am höchsten ist. Das medial bewässerte Feld FI.2 verdunstet im Mittel 1,61 mm/d und das minimal bewässerte Feld FI.3 1,33 mm/d. Damit entspricht die mittlere Verdunstung des maximal bewässerten Feldes der Bewässerungsmenge, für mediales und minimales Feld werden zusätzlich vermehrt Anteile des gespeicherten Niederschlags verdunstungswirksam. In der ersten Monatshälfte, in der keine Niederschläge aufgetreten sind, verdunstet das maximal bewässerte Feld am meisten, da diesem Feld durch das Bewässerungsregime das meiste Wasser zur Verfügung steht. Die Verdunstung in den anderen beiden Feldern ist Wasserlimitiert, d. h., die durch solare Einstrahlung zugeführte Energie würde eine höhere Verdunstung zulassen, es steht aber nicht ausreichend Wasser zur Verfügung. Diese Wasserlimitierung bei Energieüberschuss wird auch durch die Auswertung der Oberflächentemperatur (vgl. Abschnitt 7.2.3) deutlich. In der zweiten Monatshälfte gibt es mehrfach Regenereignisse, sodass sich die Verdunstungshöhen in den Feldern angleichen. Im Nachgang von Regenereignissen weisen alle Felder hohe Verdunstungsraten auf. Es ist nicht mehr klar erkennbar, welches Feld im Mittel die höchste Verdunstung aufweist.

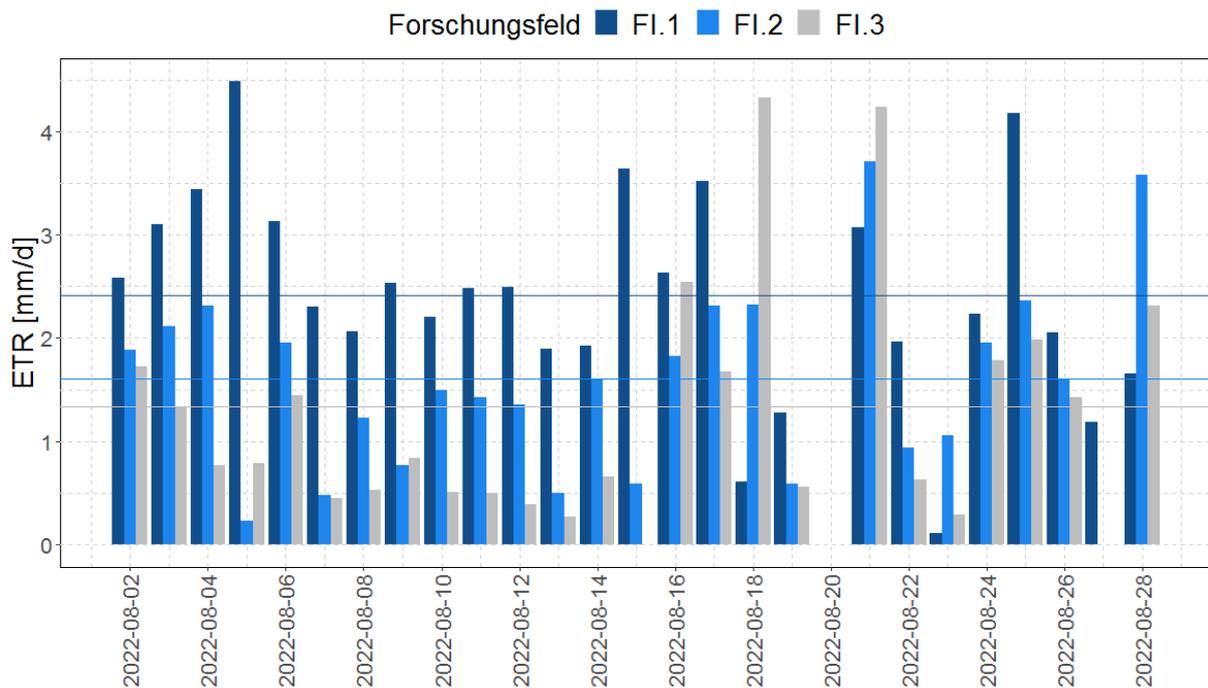


Abbildung 5.1-12: Tägliche reale Verdunstung der Forschungsfelder FI.1 bis FI.3 für den Monat August 2022 (Querlinien entsprechen den Mittelwerten).

Es muss angenommen werden, dass die ermittelte Verdunstung eine hohe Messunsicherheit aufweist. Dafür sind, neben der statistischen Unsicherheit und der Unsicherheit bedingt durch die Messgenauigkeit der Sensoren, u. a. die nachfolgenden Punkte ursächlich:

- Unterschätzung der Abflussmenge durch den Kippzähler, v. a. bei hohen Abflüssen
- Messfehler in der Abflusserfassung durch Kurzschlussströmungen an der Dachhaut (tlw. in den Daten korrigiert), Speicherung und Verdunstung aus der Regenrinne
- Offsets in der Datenreihe des Gewichts durch Verlagerung der Messfelder auf den Waagen aufgrund von Wind, Einstrahlung oder Betreten bei Bonitur oder Wartung

Die quantitative Betrachtung der Messunsicherheiten Die quantitative Betrachtung der Messunsicherheiten ist nicht Gegenstand dieses Projektes. Bei vergleichbaren Folgeprojekten ist die Klärung erforderlich.

Neben der Ermittlung der realen Verdunstung aus der Wasserbilanz bieten die Messdaten die Möglichkeit der Verdunstungsmodellierung z. B. nach Penman-Monteith oder mit EPA SWMM.

### 5.1.6. Langzeitsimulation des Wasserhaushalts

Zur Unterstützung der Bestimmung der Bewässerungsmengen wurden langjährige Wasserbilanzen auf Grundlage der Klimadaten der DWD-Wetterstation Dresden-Strehlen (Stations-ID 1051) ermittelt. Die Station befindet sich 3 km südöstlich der Untersuchungsflächen auf dem Gelände einer Gärtnerei und weist damit sehr ähnliche Randbedingungen wie das Forschungsgründach auf. Dabei dienen die täglichen Niederschläge (DWD, 2021) und tägliche abgeleitete reale und potentielle Verdunstung über Gras (DWD, 2019) als klimatische Eingangsgrößen. Die Auswertung erfolgte für den Zeitraum 2007 – 2022. Für die Bilanzbetrachtung wurden die Differenzen aus Niederschlag und realer Verdunstung gebildet und im Substrat kumuliert. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass Abfluss erst bei Überschreiten der Feldkapazität (42% / 84 mm Wassergehalt) auftritt.

Für die Bewässerungsszenarien wurde angenommen, dass die Bewässerungsmenge zusätzlich zur realen Verdunstung ohne Bewässerung und bis maximal zur potentiellen Verdunstung zur Verfügung steht. Die Differenz zwischen Niederschlag und Bewässerung sowie Verdunstung, wird analog zu oben im Substrat kumuliert. Bewässerung wurde für die Monate Mai bis Oktober mit den Regimen maximal (2,4 mm/d), medial (1,2 mm/d) und minimal (0,6 mm/d) angenommen.

In Abbildung 5.1-13 sind die Ergebnisse der Wasserbilanzsimulation zusammengefasst. Wie zu erwarten, treten die Maxima der Verdunstung und die Minima der Substratfeuchte in den Sommermonaten auf. Durch die Bewässerung können die Verdunstungsraten insbesondere in trockenen Sommern (z.B. 2011, 2015, 2020, 2022) deutlich erhöht werden. Die Substratfeuchte unterschreitet in jedem Sommer zeitweise den kritischen Wert für Trockenstress von 50% nutzbarer Feldkapazität (23,5% / 47 mm Wassergehalt). Dabei tritt Trockenstress auch regelmäßig bereits im April auf, wenn die Frühlingsmonate warm und trocken ausfallen (z.B. 2007, 2009, 2012, 2019, 2022). Hier wäre eine angepasste Bewässerungsstrategie, z.B. mit Beginn der Bewässerung nach sieben andauernden Tagen Trockenstress sinnvoll. Um die Vorhaltedauern für die Speicherbemessung einschätzen zu können, wurden klimatologische und Boden/Substrat-Trockenperioden ausgewertet. Dabei wurden klimatologische Trockenperioden als Zeiträume definiert, in denen an mindestens sieben aufeinanderfolgenden Tagen mehr Wasser real verdunstet, als durch Regen bereitgestellt wird. In den 16 bilanzierten Jahren gibt es 189 dieser Perioden (12 pro Jahr) mit einer mittleren Dauer von 12 Tagen, davon lagen 112 Perioden (60%) in den Bewässerungsmonaten. Die längste klimatologische Trockenperiode, mit 44 Tagen Dauer, trat von 22.03. – 06.05.2007 auf.

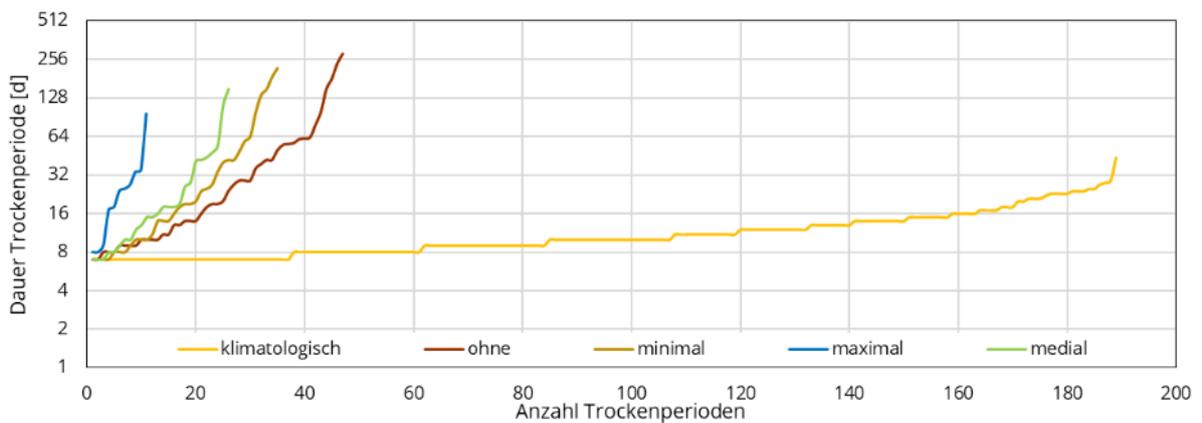
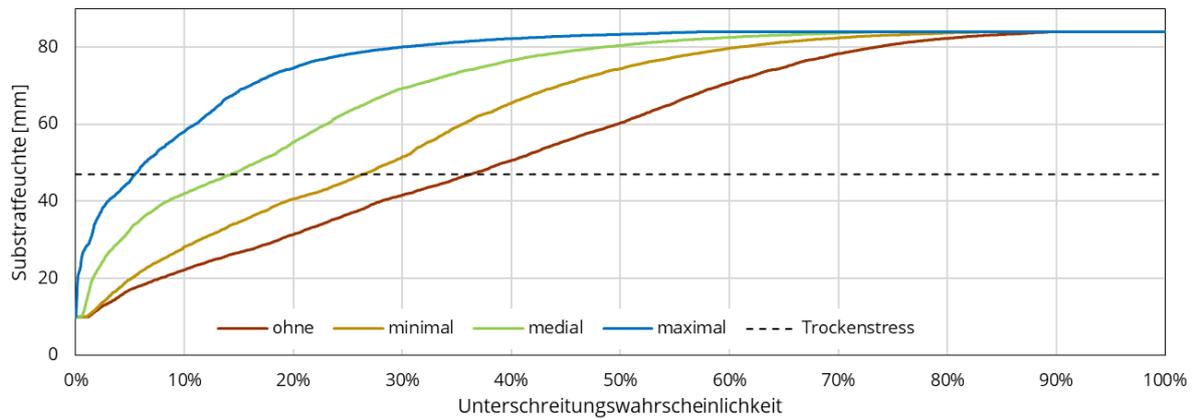
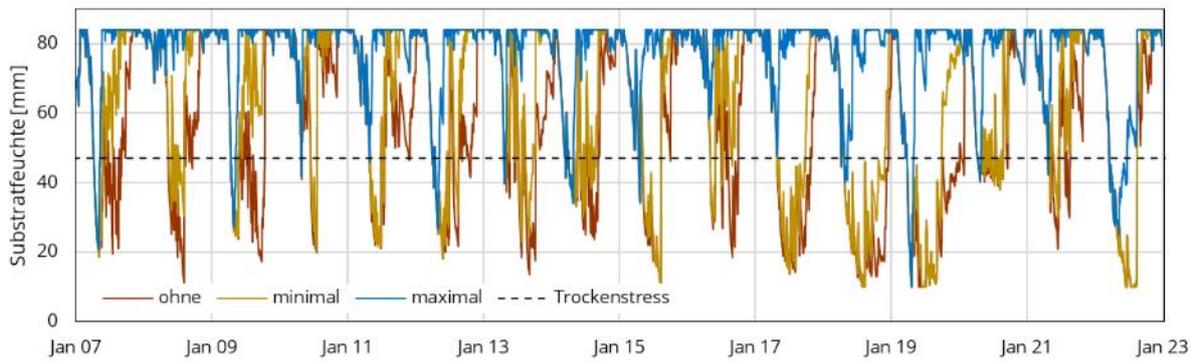
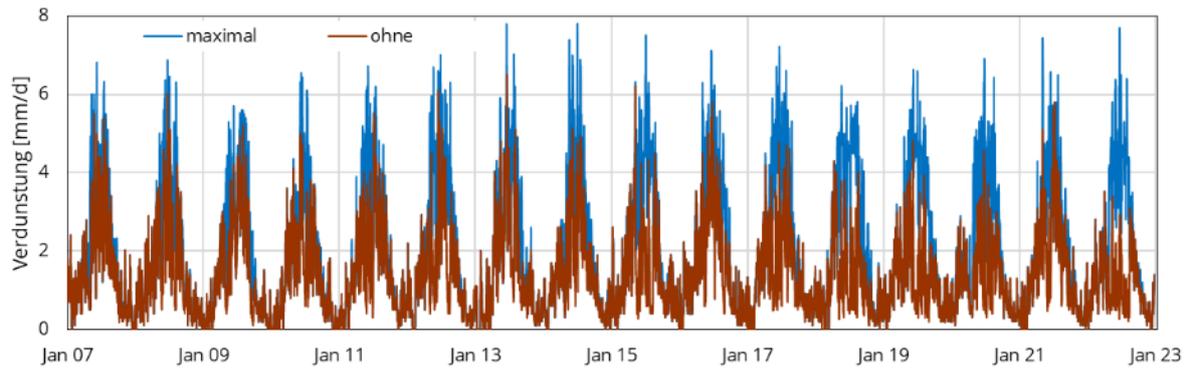


Abbildung 5.1-13: Bilanzierte Verdunstung und Substratfeuchte im Zeitraum 2007 – 2022 für bewässerte und unbewässerte Dachbegrünungen. Oben tägliche Verdunstungsraten, 2. von oben Zeitreihe der Substratfeuchte, 3. von oben Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Substratfeuchten, unten Anzahl und Dauer der Trockenperioden.

Perioden der Boden- / Substrattrockenheit sind Zeiträume, in denen der Wassergehalt des Bodens an mindestens sieben aufeinanderfolgenden Tagen weniger als 50% der nutzbaren Feldkapazität (23,5% / 47 mm Wassergehalt) beträgt. Ohne Bewässerung treten 47 (3 pro Jahr) dieser Perioden mit einer mittleren Dauer von 43 Tagen und maximal 238 Tagen auf. Alle vier Perioden der Substrattrockenheit, die länger als 100 Tage dauerten, traten in den Jahren nach 2015 auf. Durch die Bewässerung konnte die Substrattrockenheit auf 35 (minimal), 26 (medial) und 11 (maximal) Perioden verringert werden, dabei nahmen auch die Dauern der längsten Perioden auf 187 Tage (minimal), 112 Tage (medial) und 78 Tage (maximal) ab. Die längsten Perioden treten jeweils vor Beginn der Bewässerungsperiode im Spätwinter und Frühjahr auf, so dass aus Sicht des Wasserhaushalts ein früherer Bewässerungsbeginn sinnvoll sein kann.

### 5.1.7. Dimensionierung von Wasserspeichern

Die Zwischenspeicherung des anfallenden Grauwassers ermöglicht es, Wasser aus Perioden ohne Bewässerung vorzuhalten und erhöht die Versorgungssicherheit. Die DIN 1989-1 sieht im vereinfachten Verfahren für die Dimensionierung von Regenwasserspeichern ein Volumen von mindestens 6 % des Jahreswasserbedarfs vor, um eine dreiwöchige Trockenheitsperiode überbrücken zu können. Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, traten im Simulationszeitraum 17 meteorologische und 21 Substrat-Trockenperioden auf, die diese dreiwöchige Trockenheit übertreffen. Sie waren damit häufiger als einmal pro Jahr anzutreffen.

Um die Zuverlässigkeit der Speicherung zu bewerten und generalisierbare Aussagen über die Bemessung der Speicher treffen zu können, wurde eine Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren durchgeführt. Dabei wurden angeschlossene versiegelte Fläche (bei Regenwasserspeicherung), angeschlossene Personenzahl (bei Grauwasserspeicherung) und Volumen des Speichers (bei beiden Wasserressourcen) sowie jeweils bei kombinierter Grau- und Regenwasserspeicherung betrachtet. Ausgangskonfiguration war eine Kombination aus einem Quadratmeter versiegelter angeschlossener Fläche, 0,01 Einwohnerwerten oder 0,8 Litern Grauwasseranfall, sowie 100 Litern Speichervolumen jeweils je Quadratmeter bewässerter Fläche. In Abbildung 5.1-14 ist beispielhaft der Verlauf der Speicherfüllung in der beschriebenen Ausgangskonfiguration für die verschiedenen Quellen der Wassergewinnung und bei maximaler Bewässerungsintensität dargestellt. Während der Speicher bei Grauwassernutzung in jeder Bewässerungssaison anhaltend vollständig entleert wird, tragen die Regenspenden zu einem temporären Wiederanstieg der Speicherfüllung bei. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Grauwasser auch bei leerem Speicher kontinuierlich bereitgestellt wird und für die Bewässerung genutzt werden kann. In der abgebildeten Konfiguration übersteigt aber der Wasserbedarf das -dargebot und damit bleibt der Speicher entleert. Für die Versorgung mit Regenwasser, fällt eine größere Varianz innerhalb des Jahresverlaufs aber auch im Vergleich der Jahre auf. In trockenen Sommern (z.B. 2008, 2015, 2017 – 20) wird der Speicher temporär vollständig entleert. Im Gegensatz zur

Versorgung mit Grauwasser, steht in diesen Phasen kein Wasser für die Bewässerung zur Verfügung. Durch die kombinierte Nutzung von Grau- und Regenwasser können die Perioden mit vollständiger Speicherentleerung für das betrachtete Szenario auf wenige Tage in den Jahren 2018, 2019 und 2022 begrenzt werden.

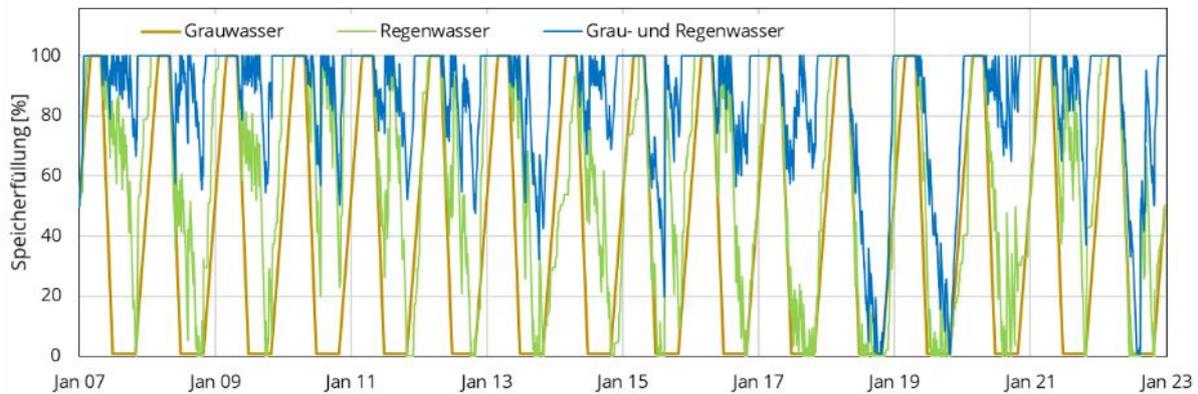


Abbildung 5.1-14: Verlauf der Speicherfüllung bei Nutzung von Grau- und Regenwasser im Zeitraum 2007 – 2022 für die Ausgangskonfiguration des Wasserertrags und bei maximaler Bewässerungsintensität.

Für die Sensitivitätsanalyse wurde jeweils ein Faktor variiert und die anderen gleich belassen. Die Spannweite der Variation, wurde so gewählt, dass entweder eine sehr hohe Zuverlässigkeit erreicht wurde oder der Parameter nicht mehr sensitiv war. Die Bewässerungsregimes wurden analog zum vorherigen Abschnitt gewählt. Die entsprechenden Bewässerungsmengen (minimal 110 mm/a, medial 220 mm/a, maximal 440 mm/a) liegen dabei im oberen Bereich der in DIN 1989-1 empfohlenen Spannweite von Bewässerungsmengen (60 mm/a für Grünanlagen bis 200 mm/a für Sportanlagen).

Abbildung 5.1-15 zeigt in den oberen drei Panels die Auswertung des Anteils der Tage, an denen der Speicher während der Bewässerungsperioden vollständig entleert wird oder leer ist. Bei Versorgung mit Regenwasser erweist sich die Größe der versiegelten Fläche als maßgebliche Einflussgröße für die Versorgungssicherheit. Dabei nimmt die Sensitivität mit zunehmender Fläche ab. Bei höherem Wasserbedarf steigt auch die notwendige Fläche zur Wassergewinnung. Für Versorgungssicherheit an 95% der Tage wären bei minimaler Bewässerung 20% der Bewässerungsfläche als versiegelte Fläche zur Wassergewinnung notwendig, für mediale Bewässerung erhöht sich dieser Wert auf 100% und für maximale Bewässerung auf 350%. Für die höheren Bewässerungsintensitäten ist also überproportional mehr Fläche zur Wassergewinnung notwendig, weil die Speichergröße einen geringeren Beitrag zur Versorgung leistet. Bei zusätzlicher Speicherung von Grauwasser (0,01 Personengleichwerte je Quadratmeter bewässerte Fläche) erhöht sich die Versorgungssicherheit bzw. verringert sich die notwendige Fläche, um die gleiche Versorgungssicherheit zu erreichen. Dabei ist der Beitrag des Grauwassers höher, wenn eine geringere Bewässerungsmenge benötigt wird oder weniger Fläche für die Wassergewinnung zur Verfügung steht. Für die Versorgungssicherheit an 95% der Tage

wäre bei minimaler Bewässerung keine zusätzliche Fläche notwendig, für mediale Bewässerung 25% und für maximale Bewässerung 200%.

Bei der Dimensionierung für Grauwasser liegt der sensitive Bereich, in dem die Versorgungssicherheit bei zunehmendem Wasserangebot stark zunimmt, für alle Regime in einem relativ engen Fenster. So erhöht sich für das minimale Regime bei einer Zunahme von 0,27 auf 0,75 Personen je 100 m<sup>2</sup> bewässerter Fläche von 20% auf 95 % Versorgungssicherheit. Für das maximale Regime findet die gleiche Steigerung der Versorgungssicherheit bei Grauwasserspeicherung von 1,0 zu 1,45 Personen je 100 m<sup>2</sup> bewässerter Fläche statt. Die zusätzliche Speicherung von Regenwasser führt hier zu einer ausgeprägten Steigerung der Versorgungssicherheit, vermutlich, weil jeweils bereits ein signifikanter Anteil des Tagesbedarfs aus dem Grauwasser gedeckt wird. Für das maximale und mediale Regime bewirkt die Regenwasserspeicherung in jedem Fall zu einer Versorgungssicherheit von über 95%, die maximale Bewässerung erreicht diese Sicherheit erst bei 1,4 Personen je 100 m<sup>2</sup> bewässerter Fläche.

Das Speichervolumen erwies sich nur für kleine spezifische Größen als sensitiv für die Versorgungssicherheit. Zwischen 0,1 und 1 m<sup>3</sup> je 10 m<sup>2</sup> Bewässerungsfläche (0,01 bis 0,1 m spezifische Speicherhöhe) stieg die Versorgungssicherheit für alle minimalen und die mediale Bewässerung mit kombinierten Wasserquellen jeweils auf über 95%. Für alle anderen Bewässerungsregime konnte diese Versorgungssicherheit auch mit 0,3 m spezifischer Speicherhöhe nicht erreicht werden. Die deutlichsten Auswirkungen hat die Steigerung des Speichervolumens bei der Bewässerung mit Grauwasser. Hier bewirken größere Speicher besonders zu Beginn der Bewässerungsperioden für einen längeren Zeitraum Versorgungssicherheit.

Zusätzlich zu den Tagen mit zumindest anteiliger Speicherfüllung sind im untersten Panel der Abbildung die Anteile der Tage dargestellt, an denen zumindest eine teilweise Wasserbereitstellung möglich ist. Da bei Grauwasserversorgung immer zumindest das am Tag anfallende Grauwasser verwendet werden kann, liegt diese Kenngröße in allen Konfigurationen bei 100% und ist nicht in der Abbildung enthalten. Für die Regenwasser-Regime zeigt sich die umgekehrte Tendenz wie bei der oben beschriebenen Speicherfüllung. Ausgehend von 10% Fläche zur Wassergewinnung steht respektive 59%, 43% und 38% Tagen für das minimale, mediale und maximale Regime Wasser bereit. Eine Steigerung auf 75%, 150% bzw. 300% der Fläche für die jeweiligen Regime erhöht den Anteil der Tage mit Wasserbereitstellung auf 95%. Auch für die Tage mit Wasserbereitstellung erwies sich die Speichergröße als weniger sensitiv. Die kleinste untersuchte Speicherhöhe von 0,1 m ermöglicht Bewässerung an respektive 85%, 64% und 46% der Tage für die drei Regime. Eine Steigerung auf 0,5 m für das minimale Regime bzw. 1 m für das mediale Regime bewirken Wasserbereitstellung an 95% der Tage. Für das maximale Regime wird auch bei 3 m Speicherhöhe nur eine Wasserbereitstellung an 74% der Tage erreicht.

Zusammengefasst zeigen die Auswertungen, dass sich die Einflussgrößen Wasserbedarf, Wassergewinnung und Speichergröße gegenseitig beeinflussen. Durch die die Sensitivitätsanalyse konnte die Stärke des Einflusses gegeneinander abgewogen werden und generalisierbare Aussagen zur Dimensionierung abgeleitet werden. Je nach Ausgangssituation kann die bewässerte Fläche nach der verfügbaren Wassermenge ausgelegt werden oder die benötigte Bewässerungsmenge über ausreichende Wassergewinnung sichergestellt werden. Die Nutzung von Grauwasser hat den Vorteil, dass auch in Phasen anhaltender Trockenheit Wasser bereitgestellt werden kann und das notwendige Speichervolumen entsprechend kleiner gewählt werden kann. Im Vergleich hat sich das Speichervolumen als am wenigsten sensitiv für die Beeinflussung der Versorgungssicherheit gezeigt. Insbesondere kleine Speichergrößen unter  $50 \text{ l/m}^2$  verringern die Versorgungssicherheit.

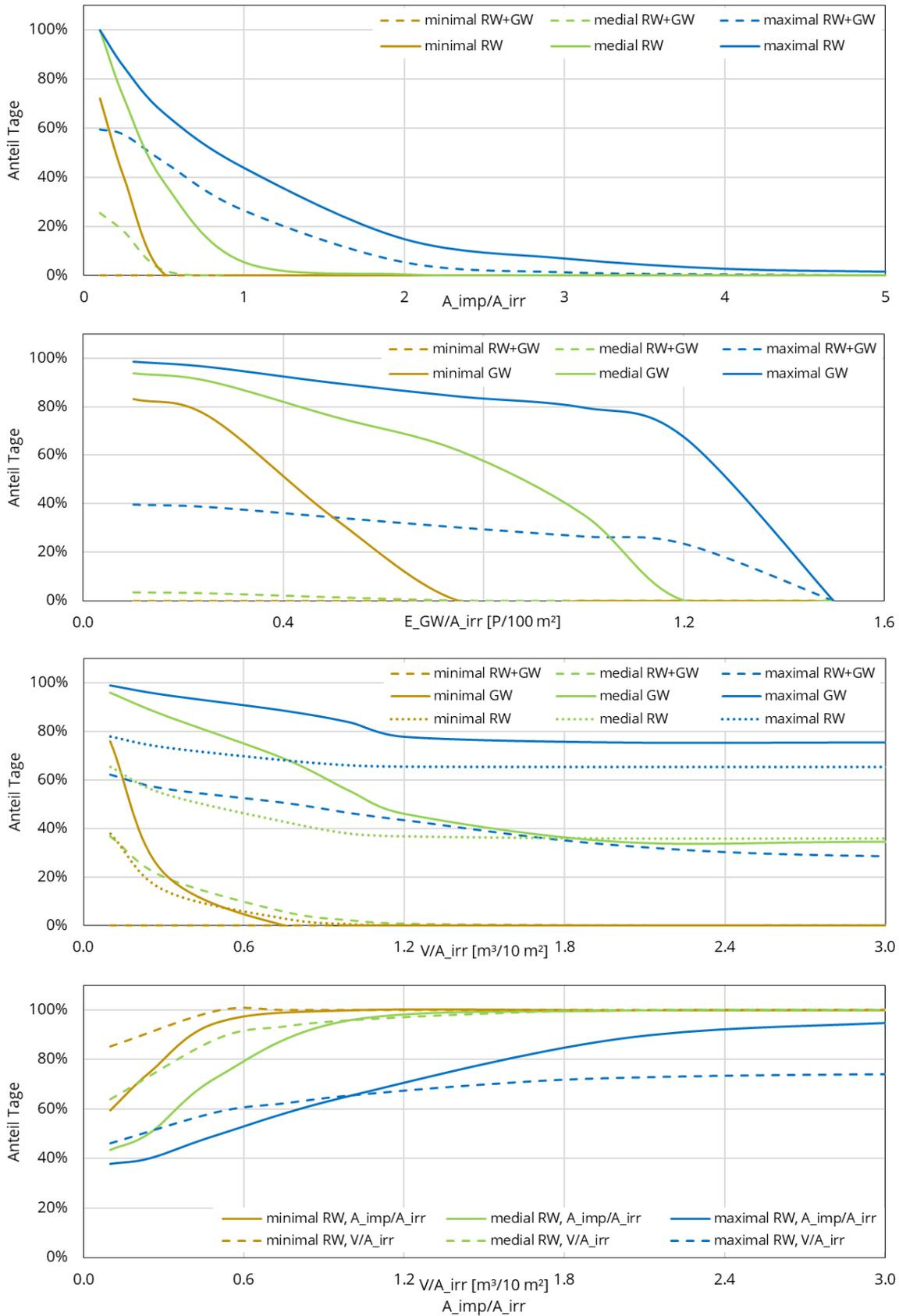


Abbildung 5.1-15: Anteil an Tagen mit leerem Wasserspeicher während der Bewässerungsphase. Oben bei Versorgung mit Regenwasser (RW), in Abhängigkeit von der angeschlossenen Fläche ( $A_{imp}$ ) je bewässerter Fläche ( $A_{irr}$ ), 2. von oben bei Versorgung mit Grauwasser (GW), in Abhängigkeit von der Anzahl angeschlossener Personen ( $E_{GW}$ ) je bewässerter Fläche, 3. von oben in Abhängigkeit vom Speichervolumen ( $V$ ) je bewässerter Fläche, unten bei Versorgung mit Regenwasser Anteil der Tage ab denen Bewässerungswasser bereitgestellt werden kann.

## 5.2. Stoffbilanzen

Die stofflichen Prozesse werden anhand ausgewählter Wasserqualitätsparameter charakterisiert. Zur Beschreibung des Kohlenstoffhaushaltes werden die Parameter des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) erfasst. Mit den Stoffkonzentrationen von Ammonium-Stickstoff (NH<sub>4</sub>-N) und Nitrat-Stickstoff (NO<sub>3</sub>-N) können der Stickstoffrückhalt und -umwandlung abgebildet werden. Zusätzlich werden Leitfähigkeit (LF) und der pH-Wert erfasst, um den chemischen Salzhalt des Substratkörpers beschreiben zu können. Darüber hinaus werden Tenside in regelmäßigen Zeitabständen erfasst, um die Akkumulation über den Betriebszeitraum bestimmen und ggf. unterscheiden zu können, ob es sich um biologisch abbaubar oder nicht abbaubare Tenside handelt.

### 5.2.1. Grauwasser

Das Grauwasser der Sozialräume des Botanischen Gartens wurde im Zeitraum Mai – Juli 2021 regelmäßig beprobt. Die Ergebnisse der 29 Stichproben sind in Abbildung 5.2-1 dargestellt. Das Grauwasser weist im Vergleich zu Literaturwerten<sup>1</sup> geringe mittlere Konzentrationen und höhere Schwankungsbreiten auf. Die Auswirkungen dieser Schwankungen auf die Reinigungsleistung der Pflanzenkläranlage und die bereitgestellte Wasserqualität sollen im weiteren Verlauf untersucht werden.

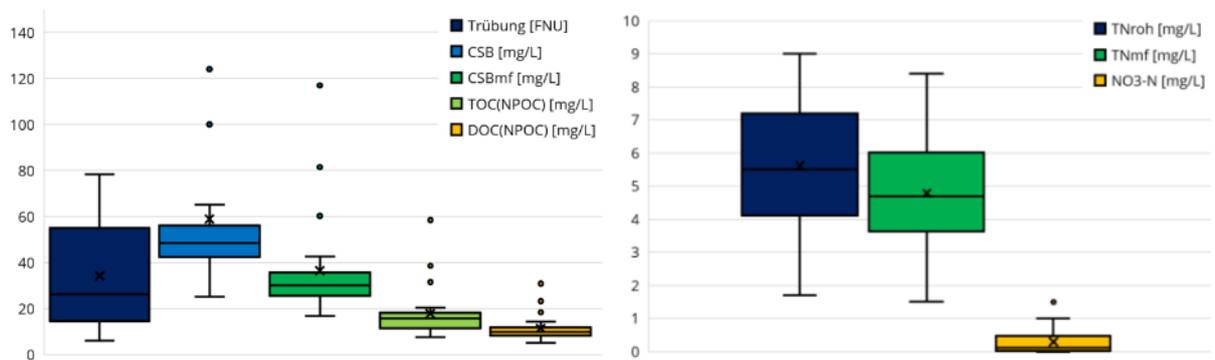


Abbildung 5.2-1: Trübung und Konzentration von organischen Summenparametern (links) und Stickstoffparametern (rechts) während einer Messkampagne im Zeitraum Mai-Juli 2021 in unbehandeltem Grauwasser.

<sup>1</sup> Michael Oteng-Peprah, corresponding author<sup>1,2</sup> Mike Agbesi Acheampong<sup>3</sup> and Nanne K. deVries (2018): Greywater Characteristics, Treatment Systems, Reuse Strategies and User Perception—a Review. *Water Air Soil Pollut.* 2018; 229(8): 255, doi: 10.1007/s11270-018-3909-8.

### 5.2.2. Bewässerungswasser

Im gleichen Zeitraum wie zuvor, vom Mai bis Juli 2021 wurde auch der Ablauf der Pflanzenkläranlage untersucht. Die Ergebnisse der 29 Stichproben sind in Abbildung 5.2-2 dargestellt.

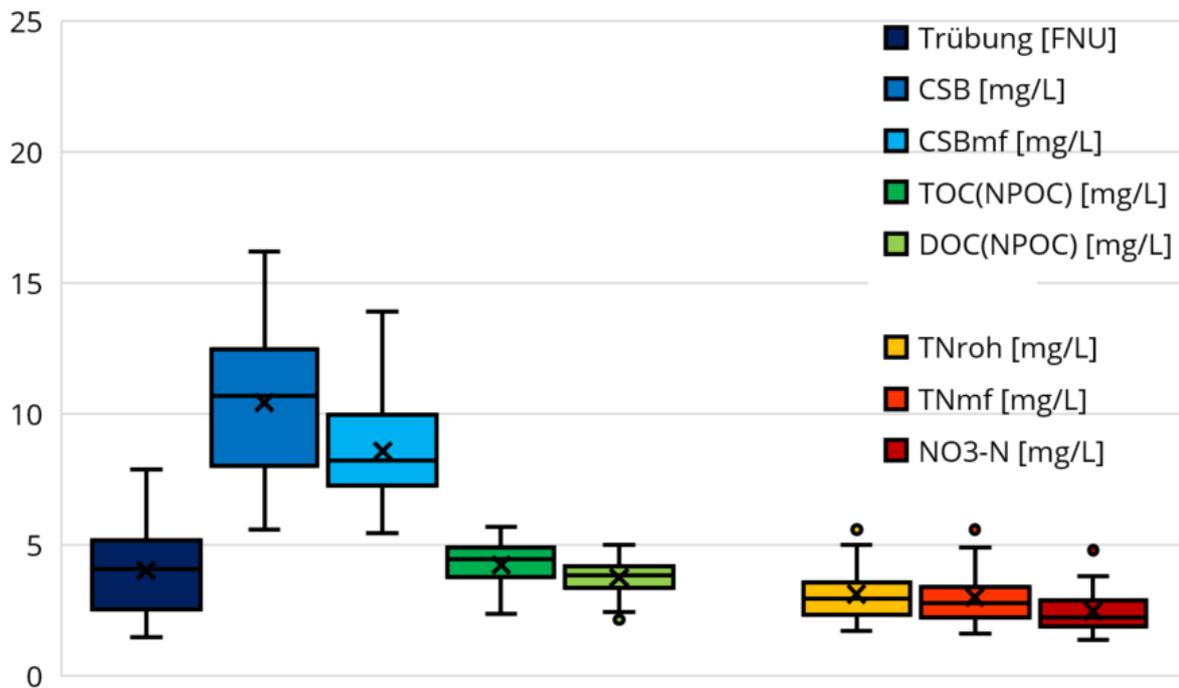


Abbildung 5.2-2: Trübung und Konzentration von organischen Summenparametern chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), gesamt organischer Kohlenstoff (TOC), gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) (links) und Stickstoffparameter Gesamtstickstoff (TNroh), filtrierter Gesamtstickstoff (TNmf), Nitrat-Stickstoff (NO<sub>3</sub>-N) (rechts) während einer Messkampagne im Zeitraum Mai-Juli 2021 in behandeltem Grauwasser.

Im Vergleich zum unbehandelten Grauwasser können 88 % der Trübung und 70 – 80 % der Kohlenstoffparameter zurückgehalten werden, dabei ist die Elimination der Gesamtkenngrößen (CSB, TOC) jeweils besser als der gelösten Fraktionen (CSBmf, DOC). Beim Stickstoff liegt die Eliminationsleistung bei etwa 40%, der Großteil des Stickstoffs wird durch die Anlage nitrifiziert (Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4: mittlere Zulauf- und Ablaufkonzentrationen der Pflanzenkläranlage und mittleren Reinigungsleistung bezogen auf die Konzentration im Zeitraum Mai-Juli 2021.

| Kenngroße       | Trübung<br>[FNU] | CSB<br>[mg/l] | CSBmf<br>[mg/l] | TOC<br>[mg/l] | DOC<br>[mg/l] | TN<br>[mg/l] | TNmf<br>[mg/l] | NO <sub>3</sub> -N<br>[mg/l] |
|-----------------|------------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|------------------------------|
| <b>Zulauf</b>   | 34.11            | 58.82         | 36.39           | 17.77         | 11.38         | 5.61         | 4.79           | 0.29                         |
| <b>Ablauf</b>   | 4.03             | 10.44         | 8.58            | 4.24          | 3.75          | 3.13         | 2.99           | 2.48                         |
| <b>Rückhalt</b> | 88%              | 82%           | 76%             | 76%           | 67%           | 44%          | 37%            | -                            |

### 5.2.3. Dachablaufwasser

Neben der Roh- und Bewässerungswasserqualität wurde auch das Dachablaufwasser im gleichen Zeitraum untersucht. Die Ergebnisse der 29 Stichproben sind in Abbildung 5.2-3 dargestellt. Es wird deutlich, dass bei allen untersuchten Kenngrößen eine deutliche Zunahme in den Konzentrationen auftritt. Diese liegt im Vergleich zum Bewässerungswasser in etwa bei einer Verzehnfachung. Mit Ausnahme der Trübung tritt sogar eine Zunahme der Konzentrationen im Vergleich zum unbehandelten Grauwasser auf. In Bezug auf die Stoffkonzentrationen muss der Ablauf der Dachbegrünungen also als Eintragsquelle angesehen werden.

Verschiedene Prozesse können die hohen Ablaufkonzentrationen verursachen: durch die Verdunstung werden mit dem Bewässerungswasser aufgebraachte Stoffe aufkonzentriert und bei Regenereignissen ausgetragen. Pflanzenwachstum und -metabolismus setzen organische Stoffe frei, die aus dem Substrat ausgespült werden und schließlich stellen die Kompostanteile in der Substratmischung selbst eine Quelle für organische Verbindungen und Stickstoff dar. Die Bedeutung dieser Prozesse und die Frachtbezogene Betrachtung der stofflichen Belastung sollen in zukünftigen Projekten untersucht werden.

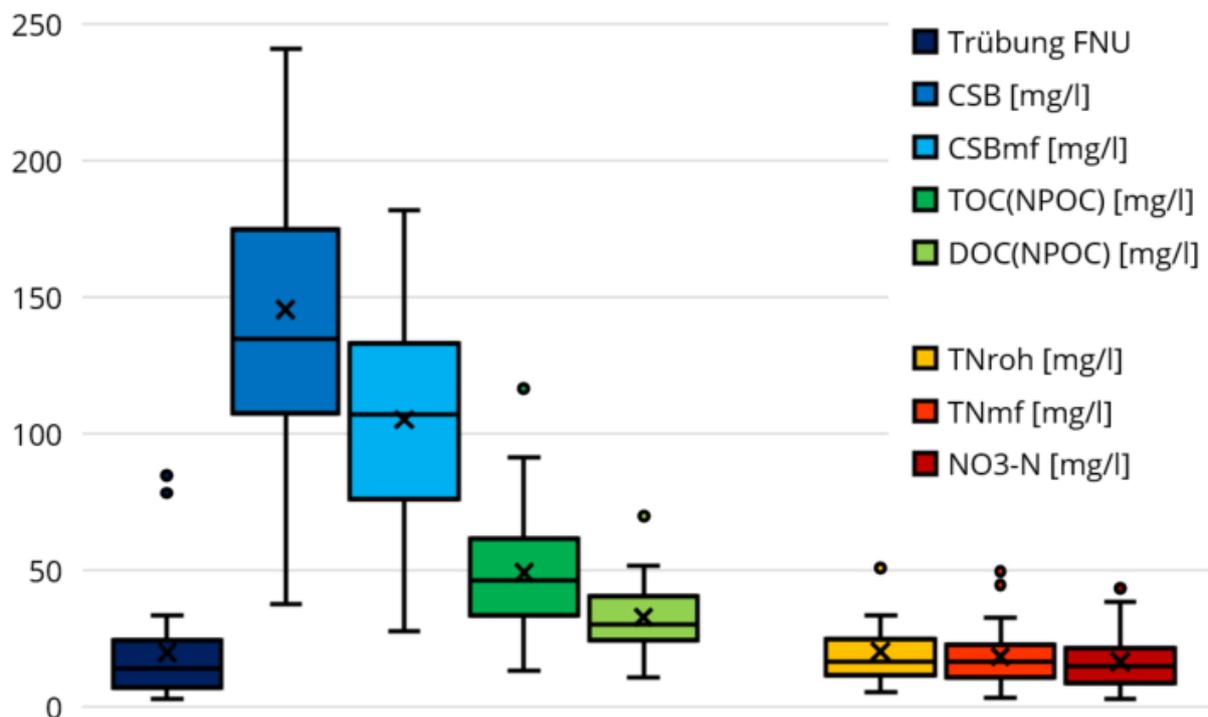


Abbildung 5.2-3: Trübung und Konzentration von organischen Summenparametern (links) und Stickstoffparametern (rechts) während einer Messkampagne im Zeitraum Mai-Juli 2021 im Dach-Abflusswasser.

## 6. Bauklimatische Untersuchung des Kühlpotenzials (Arbeitspaket 4)

### 6.1. Überblick Datenauswertung 2021 bis 2022

Die bauklimatische Messdatenauswertung fokussierte zunächst auf den gesamtheitlichen Vergleich der Temperatur- und Feuchteverhältnisse in der Gründachkonstruktion aus den Messungen der Hydraprobess in den Feldmitten. Es sollte festgestellt werden, wie groß der sich aus den unterschiedlichen Bewässerungs- und Einstrahlungsregimen entwickelte Unterschied zwischen den Versuchsfeldern ist. Zu diesem Zweck wurden die Temperaturmessungen für alle Felder für den gesamten Messzeitraum der beiden Jahre 2021 und 2022 in Violin-Plots in Abbildung 6.1-1 zusammengefasst. In dieser Darstellung ist die Häufigkeitsverteilung der Temperaturkennwerte an der dunkel dargestellten Mittelachse gespiegelt. Die Whisker (dunkle Querstriche an den Enden der Hauptachsen) geben die Extremkennwerte (Minimum und Maximum über die beiden Jahre) an.

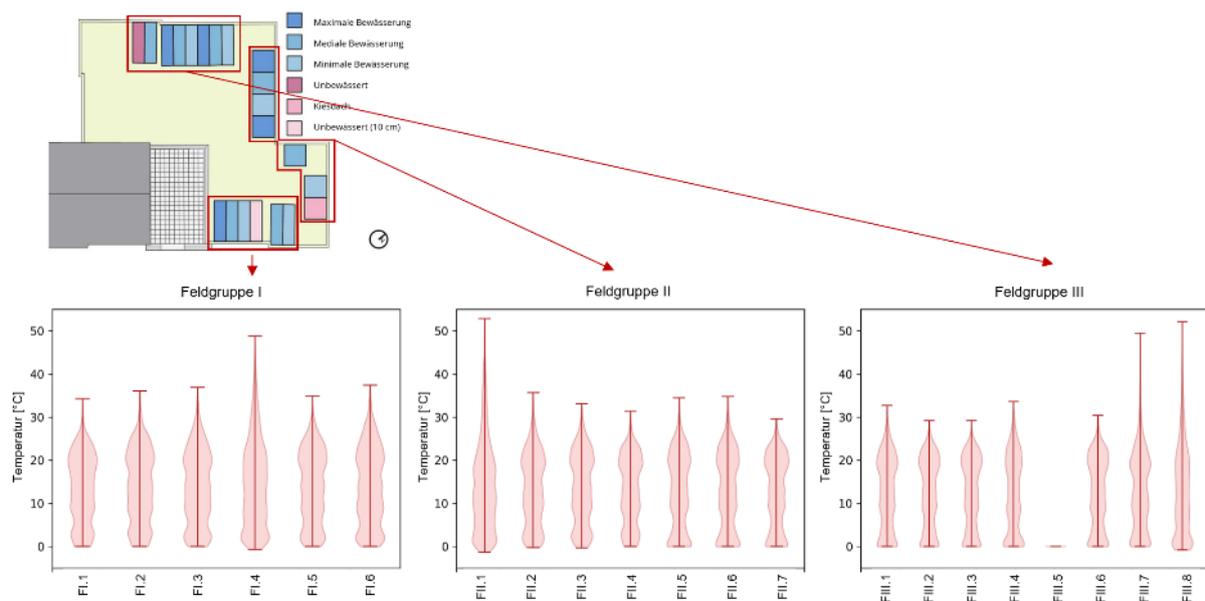


Abbildung 6.1-1: Übersicht Temperaturmessungen für alle Testfelder und für die beiden Jahre 2021 und 2022 aus den Hydraprobess, welche etwa in Feldmitte und etwa in der Mitte der Substrathöhe eingebracht wurden.

Im Vergleich der Felder ist klar zu erkennen, dass die Temperaturverhältnisse mit zunehmender Bewässerung ausgeglichener werden. Für den Sommer bedeutet das eine erheblich reduzierte maximale Substrattemperatur von ca. 35°C in den bewässerten Feldern im Vergleich zu Maximalwerten von ca. 50°C im unbewässerten Feld mit geringerer Substratschichtdicke (Feld FI.4 - linke Gruppe: viertes Feld von links) und im unbewässerten Feld mit originalem Aufbau (Feld FIII.8 – rechte Gruppe, letztes Feld rechts) sowie im Kiesfeld (FII.1 - mittlere Gruppe erstes Feld von Links). Die maximale

Außenlufttemperatur an der lokalen Wetterstation liegt im gleichen Zeitraum der beiden Jahre bei ca. 39°C.

Neben der Auswirkung auf die sommerlichen Temperaturverhältnisse im Substrat ist auch eine erhebliche Beeinflussung der winterlichen Temperaturen zu erkennen, auch wenn die Bewässerung während der Wintermonate nicht mehr aktiv war und daher mäßige Unterschiede in der Substratfeuchte zu erwarten waren. Diese Unterschiede sind vermutlich auf die Effekte der höheren Substratschicht und Pflanzenbedeckung zurückzuführen. Eine größere Substratschicht bedingt eine höhere Wärmespeicherkapazität. Eine Pflanzendecke fungiert als Schutzschicht und reduziert den konvektiven (windbedingten) und den radiativen (abstrahlungsbedingten) Wärmeübergang, jedoch auch den kurzwelligen Strahlungseintrag. Es ist gut zu erkennen, dass die meisten Felder ausschließlich im positiven Temperaturbereich schwanken. Lediglich die beiden unbewässerten Felder (unbewässertes, extensiv-gegrüntes Feld FI.4 und unbewässertes, intensiv-begrüntes Feld FIII.8) und das Kiesfeld (FII.1) zeigen einen Abfall unter die Frostgrenze.

Eine ähnliche Ausgleichswirkung wäre auch für den Feuchtegehalt der Testfelder zu erwarten gewesen. Aus den Messungen in Feldgruppe I ist jedoch ein gegenteiliger Zusammenhang ersichtlich. Je stärker die Testfelder bewässert werden, desto größer ist die Variation im Feld. Das liegt daran, dass die Messdatenübersicht sowohl Bewässerungs- als auch Winterphase zusammenfasst sind. Würden nur die Bewässerungsphasen dargestellt werden, so stellte sich mit zunehmender Bewässerung eine kompaktere Verteilung dar. Über beide Jahre 2021 und 2022 zeigt Feld FI.1 (linke Gruppe, erstes Feld von links in Abbildung 6.1-2) stärker gestreckte Werteverteilungen über den volumetrischen Feuchtegehalt als Feld FI.2 (linke Gruppe, zweites Feld).

Unabhängig von den Wertespannweiten kann am mittleren Feuchteniveau in Feldgruppe I klar zwischen den verschiedenen Bewässerungsregimen unterschieden werden. Je stärker die Bewässerung durchgeführt wurde, umso höher ist das mittlere Feuchteniveau in den Feldern. Für die übrigen Felder der Feldgruppe II und III kann dieser Zusammenhang nicht festgestellt werden. Die nachfolgende Abbildung 6.1-2 zeigt die Feuchtemessungen sortiert nach Feldgruppen und ebenfalls in der Darstellung der gespiegelten Häufigkeitsverteilungen (Violin-Plot).

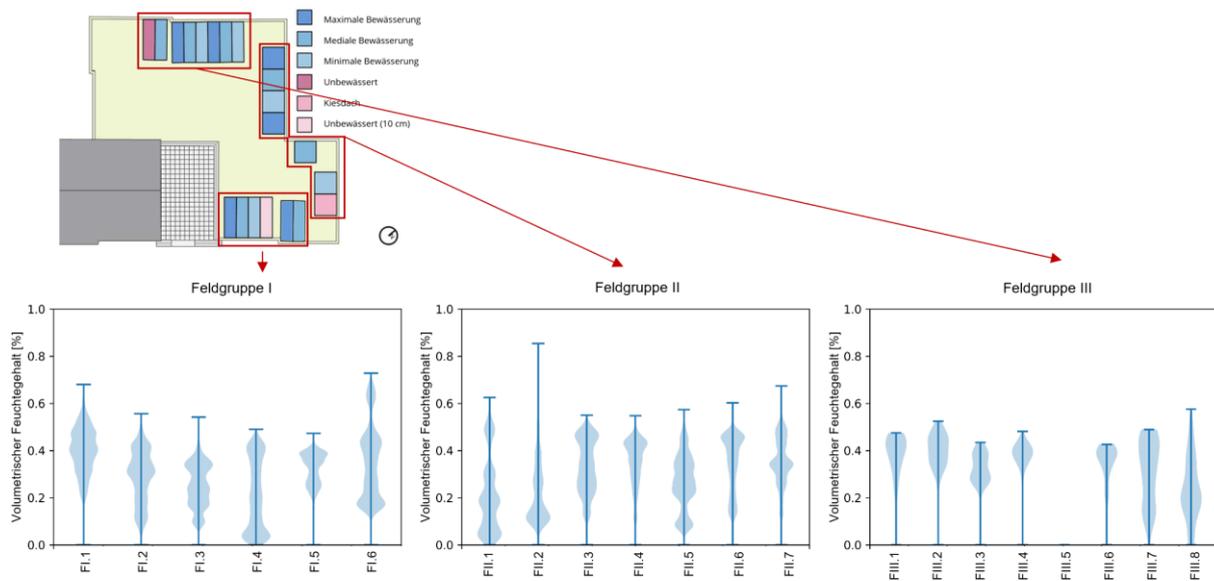


Abbildung 6.1-2: Übersicht volumetrischer Feuchtemessungen für alle Testfelder und für die beiden Jahre 2021 und 2022 aus den Hydraprobes, welche etwa in Feldmitte und etwa in der Mitte der Substrathöhe eingebracht wurden.

In der Übersicht der Feuchtemessungen ist zu beachten, dass die Kennwerte noch unkorrigiert sind. Es zeigen alle Felder Null-Werte, was Messausfällen entspricht. Ein volumetrischer Feuchtegehalt nahe 0% ist nur unter Laborbedingungen nach langandauernder Trocknung möglich. Auch die Maximalwerte bewegen sich aus dem plausiblen Bereich heraus. Laut Herstellerkennwerten beläuft sich die Porosität des Substrates auf einen Wert von ca. 57%. Von diesem Porenvolumen ist nur ein Teil wasserzugänglich, weshalb der maximale Wassergehalt ca. 10% darunter, d.h. bei ca. 37-40%, liegt. In diesem Wertebereich sollten auch die Höchstwerte der Messreihen liegen. Tatsächlich bewegen sich diese bis über 60%, d.h. sogar oberhalb des Porenvolumens. Lediglich in Feldgruppe III liegen die maximalen Messwerte im plausiblen Bereich. Auf die Herausforderungen bei der Auswertung der volumetrischen Feuchtemessung wurde bereits im Kapitel 5.1.5 Wasserbilanz und Verdunstung hingewiesen. Auch die Bauklimatik-Partner haben sich mit dem Thema der Datenauswertung für die Feuchtemessungen auseinandergesetzt, jedoch nicht aus dem Blickwinkel der laborbasierten Kalibrierung (siehe Abschnitt 5: Kalibrierung Feuchtesensoren), sondern aus dem Blickwinkel der datenbasierten Wertekorrektur. Zwei Schwierigkeiten dieser Auswertung sind in der unten aufgeführten Grafik dargestellt, in welcher redundanten Messungen des Gewichts und des Wassergehaltes dargestellt sind. Beide Kennwerte dienen der redundanten Ermittlung der Feuchteänderung im Substrat. Die Wägung zeigt, wie in Abbildung 6.1-3 zu erkennen ist, nicht nur im Feld FI.1, zyklische Schwankungen, die nicht erklärbar sind. Die volumetrische Feuchteänderung zeigt, als Konsequenz der verwendeten Sensorik und der Sensorplatzierung im Feld (Punktmessung und daher keine Repräsentanz der gesamten Feldbedingung) starke Schwankungen mit teilweise physikalisch unplausiblen Werten.

Hinzu kommt die Schwierigkeit, dass das Trockengewicht der Felder nicht bekannt ist, wodurch eine Überführung der Wägungsdaten in absolute Kennwerte der volumetrischen Feuchtemessung nicht möglich ist.

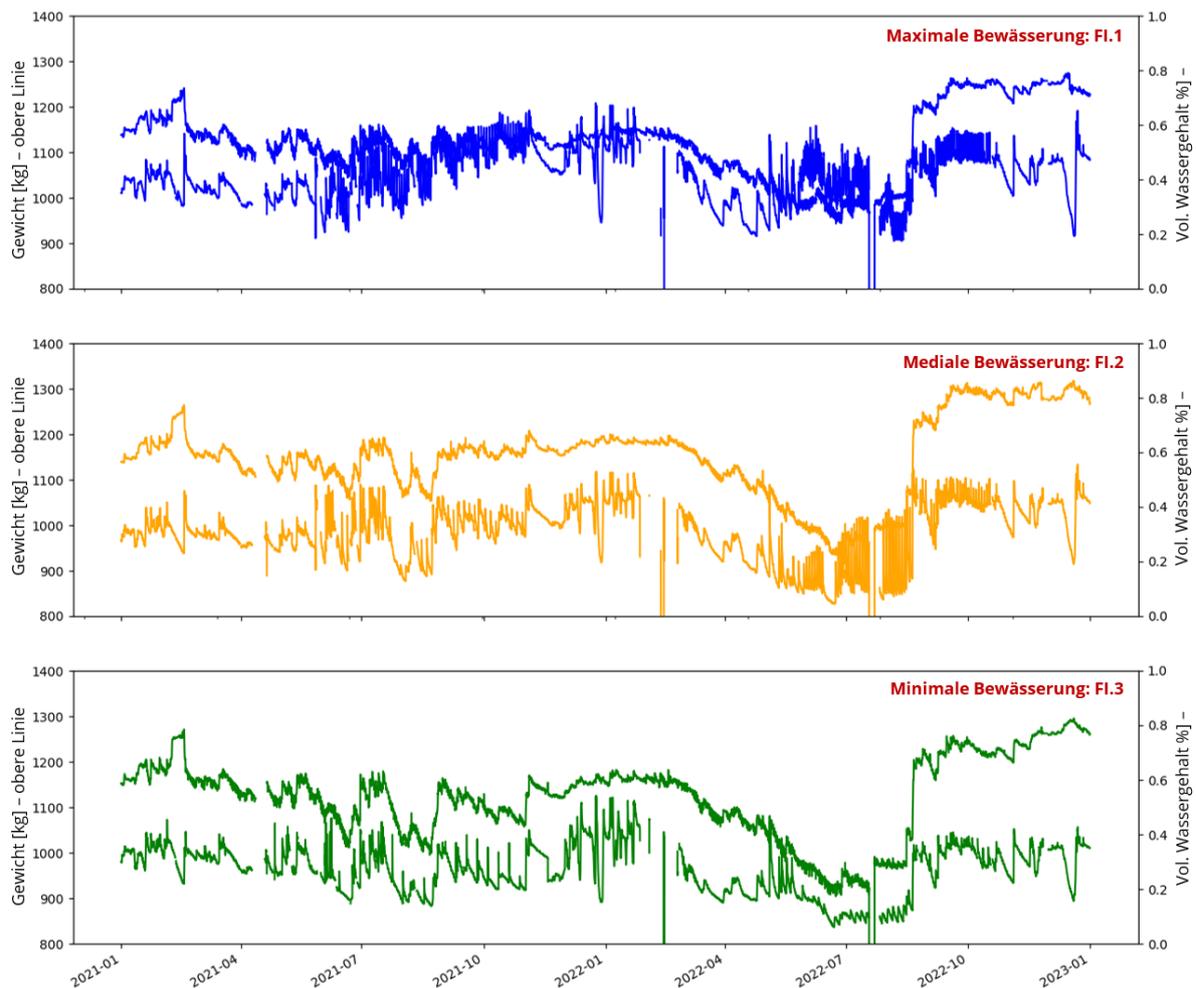


Abbildung 6.1-3: Übersicht der redundanten Messungen für die Feuchtegehaltsänderung: Wägung (oberer Linien) und volumetrische Feuchtemessung (untere Linien).

Der Ansatz der Bauklimatik bestand darin, beide Zeitreihen in ihrer ersten Ableitung (Feuchteänderung) gegenüberzustellen, um systematische Abweichungen sichtbar zu machen und ggf. zu korrigieren. Diese Gegenüberstellung enthält Abbildung 6.1-4.

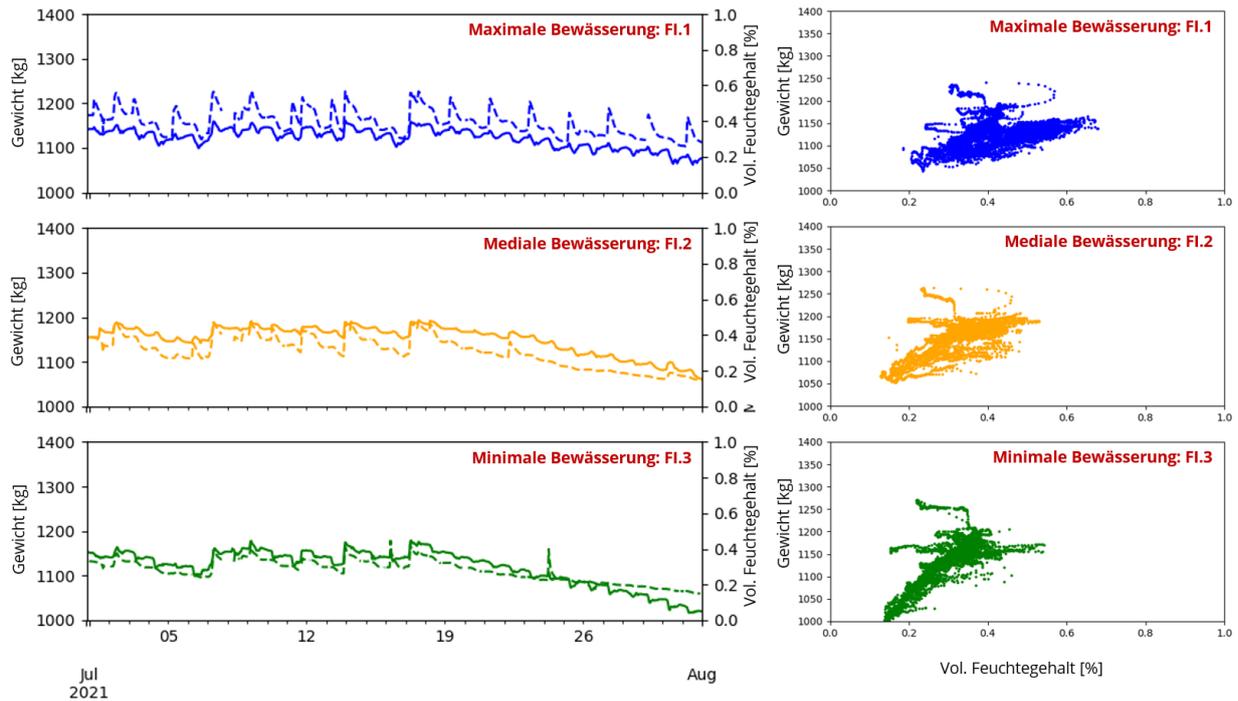


Abbildung 6.1-4: Gegenüberstellung der Feuchtemessungen aus Wägung und volumetrischem Feuchtegehalt unkorrigiert für die Felder FI.1 (blau), FI.2 (gelb) und FI.3 (grün), links ist ein Ausschnitt der Zeitreihen für Sommer 2021 dargestellt, rechts ist das Streudiagramm für den gesamten Datensatz 2021-2022 abgebildet.

Die Ausreißer in der Wägung sind in dieser Abbildung klar zu erkennen. Sie konnten zum Teil über die Begrenzung maximaler Feuchteänderungen entfernt werden. Ein weiterer Schritt war die Glättung der Zeitreihen, sowohl der Wägungsdaten, als auch der volumetrischen Feuchtemessung. Die Glättung verbesserte grundsätzlich die Korrelation zwischen beiden Wertereihen. Allerdings sollten vor der Anwendung von Glättungsansätzen die tageszyklischen Änderungen in den Wägungsdaten entfernt werden. Hierfür wurden Methoden der Datendekomposition angewandt, welche die Messdaten in den Trend, die (tages-)zyklische Veränderungen und das Hintergrundrauschen zerlegen. Leider brachte auch dieser Ansatz nicht den gewünschten Effekt, da die tageszyklischen Änderungen nicht zu festen Zeiten auftraten und damit nur ein Bruchteil herausgefiltert werden konnte. Sie sind wahrscheinlich eine Konsequenz von Klimarandbedingungen, z.B. thermischen Ausdehnungseffekten in den Edelstahlwannen oder der Sensorik. Eine Korrektur des Datensatzes war im Rahmen dieses Projektes nicht möglich. Damit sind sowohl die volumetrischen Feuchtemessungen als auch die Wägungsdaten als wesentliche Bestandteile der Evapotranspirationsbilanz stark fehlerbehaftet und eine Interpretation der Bilanzergebnisse kann nur unter Vorbehalt erfolgen.

Neben diesen Herausforderungen in der Messdatenauswertung ist für die Feuchtemessung auch zu berücksichtigen, dass sie unterschiedliche phänomenologische Phasen und Effekte abdecken. Es wurden nicht nur die Bewässerungsphasen sondern auch die sich frei einstellenden Winterphasen erfasst. Ferner sind die Anfangsphasen

(Sommer 2021) enthalten, in welchen die Begrünung noch nicht vollständig entwickelt war. Darüber hinaus wurden auf einigen Feldern während der Messdatenerfassung Änderungen der Bepflanzung, des Aufbaus und des Bewässerungsregimes umgesetzt. Auch mikroklimatische Effekte wie z.B. die Windschattenwirkung des Gebäudes, können für die Auswertung der Feuchtebilanz eine Rolle spielen. So wäre zu vermuten, dass das Gebäude deutlich geringere Schlagregeneinträge und mittlere Windgeschwindigkeiten an der Dachoberfläche für die Feldgruppe I und die ersten Felder der Feldgruppe II bewirkt, da die Hauptwindrichtung am Standort Süd-West ist. Für eine bessere Beurteilung dieses Effektes könnten CFD-Simulationen der Schlagregenverteilung oder ergänzende Messungen auf den einzelnen Testflächen durchgeführt werden. Eine zusätzliche Beeinflussung der Feldverhältnisse ist aus den Unterschieden der Direkt- und Diffusstrahlungseinträge der kurzwelligen Solarstrahlung und aus der langwelligen Strahlungsbilanz der Felder zu erwarten. Darauf soll nachfolgend in der Einzelfeldbetrachtung für August 2022 eingegangen werden.

## 6.2. Auswertung der Temperaturprofilaten

Ein weiterer Fokus in der Auswertung der Messdaten wurde auf die Temperaturverhältnisse im Konstruktionsquerschnitt gelegt. Dieser dient ebenfalls dazu, den hygrothermischen Effekt der Bewässerungsstrategien abzuschätzen. Ausgewertet wurden die Temperaturlanzen in der Feldgruppe I. Die Lanzen messen in einem Abstand von drei Zentimetern an zehn verschiedenen Positionen die Temperatur. Da sich die Aufbauhöhen der Konstruktionen zwischen den bewässerten Feldern, den unbewässerten Felder und den Kiesfeldern unterscheiden, wurden abweichende Sensorpositionen in der Gegenüberstellung der Oberflächentemperaturen miteinander verglichen.

In einem ersten Schritt wurden zwei Felder, das am stärksten bewässerte Feld FI.1 und das unbewässerte, extensiv-begrünte Feld FI.4, im Jahresverlauf 2022 für die Oberflächentemperaturen, d.h. für die Sensorpositionen unter der Substratoberfläche. Die verglichenen Lanzenwerte wurden in Abbildung 6.2-1 für Position 4 in Feld FI.4 (Höhe 9 cm) und Position 7 (Höhe 18 cm) in Feld FI.1 zusammengefasst. Die blaue Kurve gibt den Verlauf der Tagesmitteltemperaturen über das Jahr an, der hellblaue Bereich im Hintergrund gibt den Schwankungsbereich der Stundenwerte an. Es zeigt sich, dass der Verlauf zu Beginn des Jahres noch gut übereinstimmt. Während der Bewässerungsphase bleibt das maximal bewässerte Feld FI.1 deutlich temperaturstabiler als das unbewässerte, extensiv-begrünte Feld FI.4. So treten im unbewässerten Feld zeitweilig über 46°C auf, während im unbewässerten Feld Maximalwerte von knapp über 40°C gemessen werden. Die Maximalwerte sind in den Monaten Juni und Juli zu verzeichnen. An der Oberfläche tritt, im Gegensatz zu den Messungen im Substrat (Hydraprobemessungen des vorherigen Abschnittes) auch Frost auf, d.h. die Temperaturen fallen zeitweilig unter 0°C ab. Erwartungsgemäß ist dieser Temperaturabfall im unbewässerten, extensiv-begrünten Testfeld FI.4 mit Minimaltemperaturen von -10°C stärker gegeben als

im maximal bewässerten Testfeld FI.1. Es ist augenscheinlich keine Jahres-Temperaturamplitudenverschiebung zu erkennen. Das wäre auf Grund der geringen Wirkung der speicherwirksamen Substratschicht an der Oberfläche des Gründachs auch nicht zu erwarten.

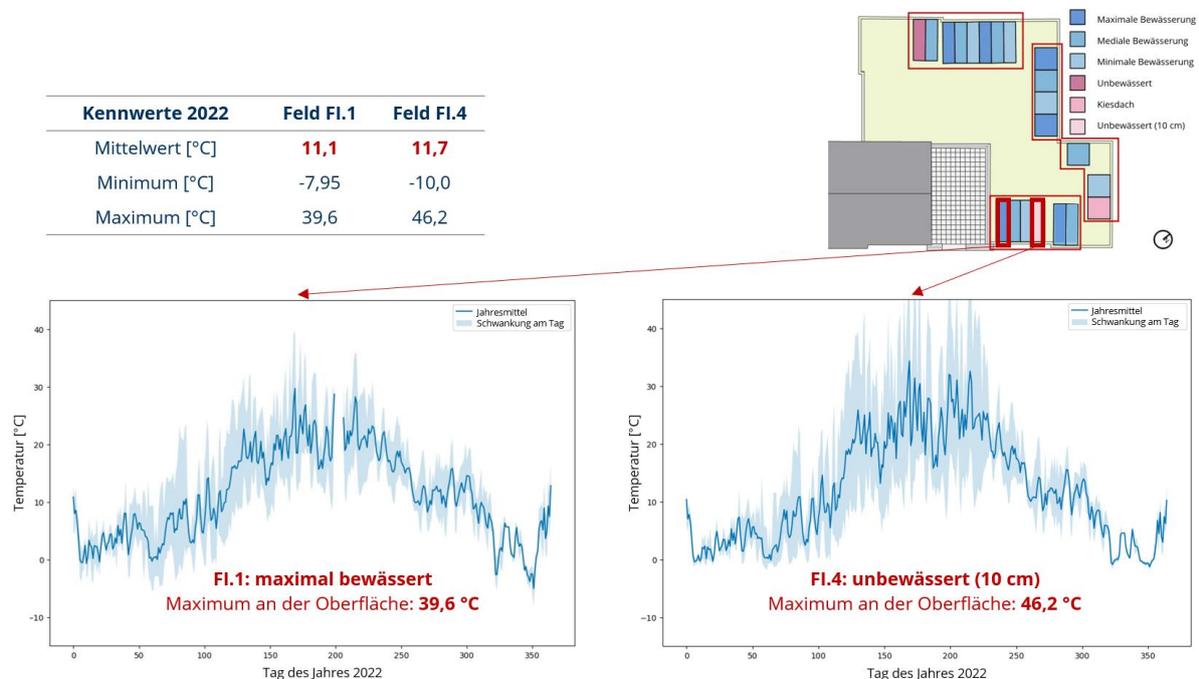


Abbildung 6.2-1: Übersicht der Temperaturmessungen aus den Lanzensensoren, welche im Endbereich der länglichen Testfelder aus Messgruppe I installiert wurden, für das Jahr 2022. Verglichen sind die **Oberflächen-**temperaturen des am stärksten bewässerten Feldes und des unbewässerten Feldes.

Einen weitaus größeren Effekt der Bewässerung auf den Jahres-Temperaturverlauf muss für den untersten Sensor der Lanzen gegeben sein, weil hier der Speichereffekt der Substratebene zum Tragen kommt. Die Gegenüberstellung dieser Position ist für das unbewässerte, extensiv-begrünte und das maximal bewässerte Feld in Abbildung 6.2-2 gegenübergestellt. Dem Speichereffekt müsste geringfügig die Drainageschicht entgegenwirken, da diese eine direkte Ankopplung an die Außenluft aufweist, wodurch die thermische Speichermasse der Substratschicht ober- und unterseitig be- und entladen wird und folglich eine beschleunigte Temperaturanpassung stattfindet. Diese dürfte durch die Wärmeleitung der Edelstahlwannen verstärkt werden. Das Maß dieser thermischen Ankopplung wird sich im Jahresverlauf danach richten, wie groß die Öffnungsquerschnitte (Entwässerung) und wie die Druckverhältnisse am Gebäude in Folge von Windeinwirkung sind. Es kann hier nicht näher eingegrenzt werden. Die Auswirkung des Speichereffektes ist in der Gegenüberstellung in Abbildung 6.2-1 und im Vergleich zu Abbildung 6.2-2 klar zu erkennen. Der Schwankungsbereich ist im Feld FI.1 sehr gering geworden, während im unbewässerten, extensiv-begrünten Feld FI.4 auf Grund der geringeren Aufbauhöhen von nur 10 cm im Gegensatz zu 20 cm in den übrigen Feldern sowie in Folge des geringeren Wassergehaltes auch am Boden des Substrates

starke Temperaturschwankungen zu verzeichnen sind. Die Differenz in den maximalen sommerlichen Temperaturen beträgt an dieser Position mehr als 10°C.

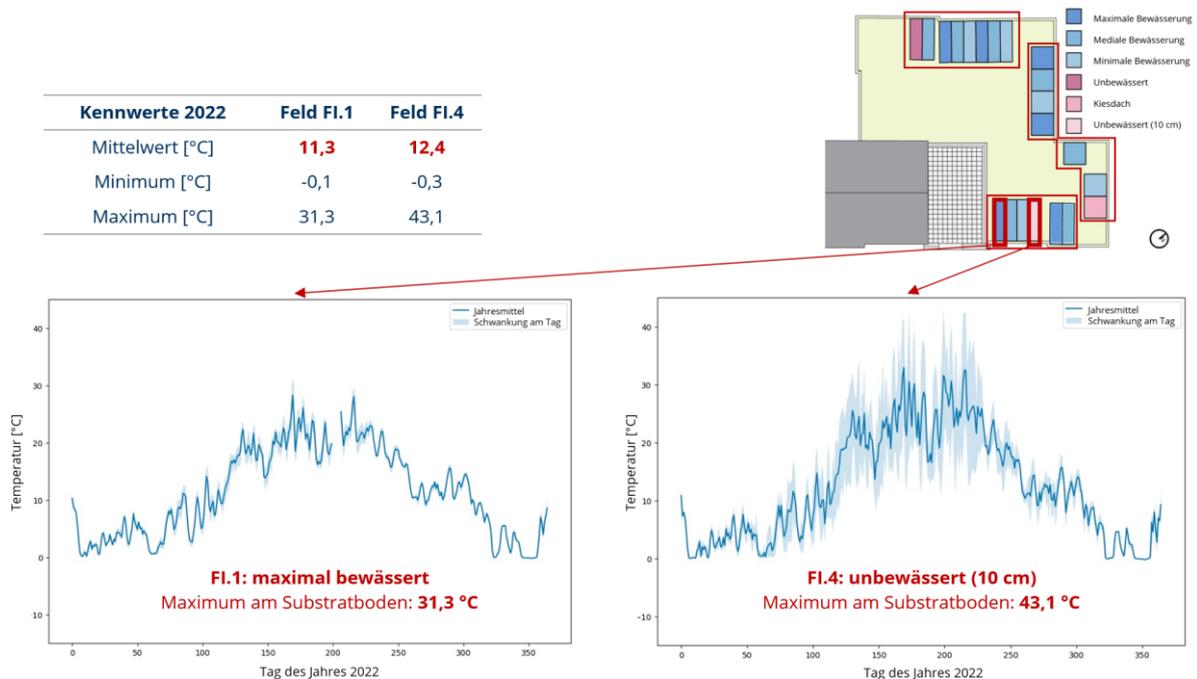


Abbildung 6.2-2: Übersicht der Temperaturmessungen aus den Lanzensensoren, welche im Endbereich der länglichen Testfelder aus Messgruppe I installiert wurden, für das Jahr 2022. Verglichen sind die **Substratbodentemperaturen** des am stärksten bewässerten Feldes und des unbewässerten Feldes.

Da die Bewässerung des Gründachs in den Sommermonaten stattfand, ist die größte hygrothermische Differenz zwischen den Feldern für diese Zeit des Jahres zu erwarten. Aus diesem Grund wurde in der nachfolgenden Abbildung 6.2-3 für den Bericht-Fokusmonat August 2022 das Tagestemperaturprofil des am stärksten bewässerten Feldes FI.1 mit dem unbewässerten, extensiv-begrüntem Feld FI.4 verglichen. Hierzu wurden ebenfalls die Temperaturmessungen unter der Substratoberfläche mit den Messungen am Substratboden verglichen, diesmal jedoch nur für den Monat August 2022. Dargestellt sind in Abbildung 6.2-4 die über den Monat August gemittelten Stundenwerte (dunkelblaue Linie) und ergänzend dazu der gesamte Schwankungsbereich der Stundenwerte (hellblauer Bereich im Hintergrund).

Zu erwarten war, ausgehend von den Jahresmessungen, ein deutlich gedämpfter Temperaturverlauf im bewässerten Feld in Folge der erheblich gesteigerten Wärmespeicherkapazität der nassen Substratschicht (Feld FI.1) gegenüber der trockenen und dünneren Substratschicht (Feld FI.4). Zusätzlich ist dieser Effekt auch für die Substratoberflächenmessungen im Vergleich zu den Substratbodenmessungen zu vermuten. Neben der Amplitudendämpfungswirkung war auch mit einer leichten Amplitudenverschiebung innerhalb beider Sensorkategorien (Oben-Unten, Unbewässert-Bewässert) zu rechnen. Zusätzlich stellte sich die Frage, ob die erhöhte Evapotranspiration der Pflanzen an der Oberfläche des bewässerten Feldes in Folge der permanenten Kühlwirkung dieser Verdunstung über die Blattoberflächen einen absenkenden Einfluss

auf das mittlere Temperaturniveau zeigt. Auch die durch die Blätterebene veränderten Absorptions- und Emissionsbedingungen für kurz- und langwellige Strahlung verursachen Unterschiede. Die Bonitur für den Monat August 2022 ergab für die Felder einen Bedeckungsgrad von ca. 95% im maximal bewässerten Feld und ca. 65% im unbewässerten Feld (Mittelwert der Bonituren vom 05. August und 19. August 2022). Das Evapotranspirationspotenzial des bewässerten Feldes ist in Folge dieses höheren Bedeckungsgrades deutlich höher. Hinzu kommt der Umstand, dass der höhere Feldfeuchtegehalt den Pflanzen auch ein größeres Wasserreservoir zur Verfügung stellt.

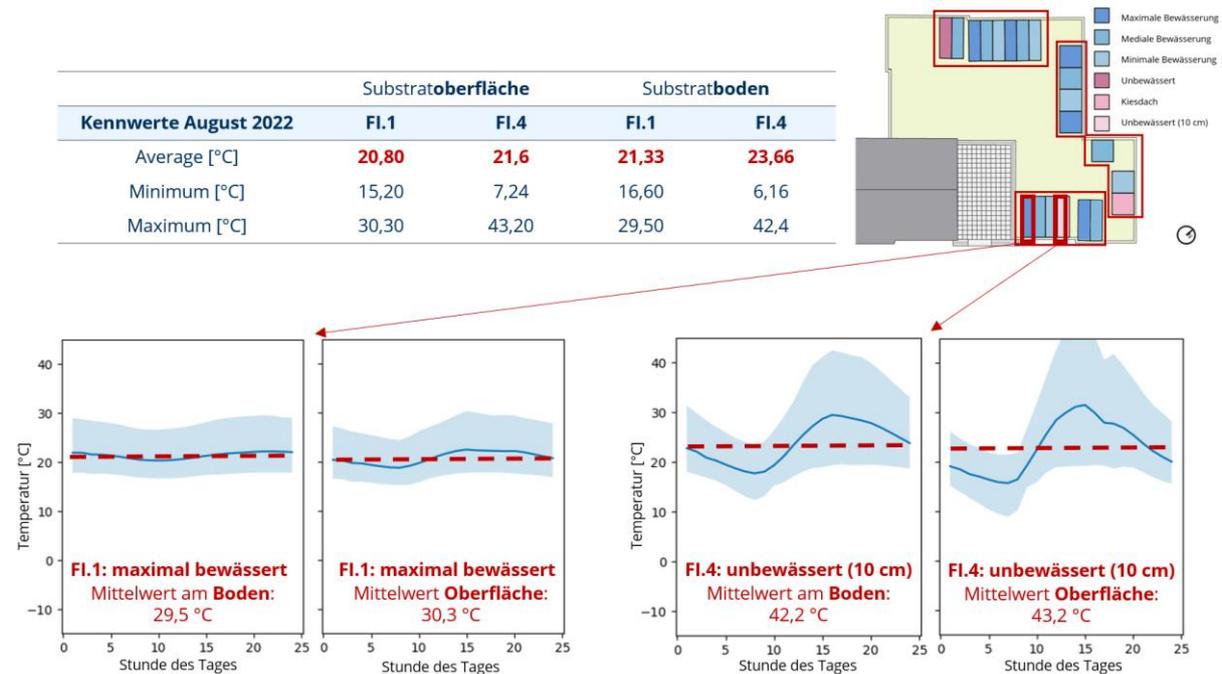


Abbildung 6.2-3: Übersicht der Temperaturmessungen aus den Lanzensensoren für das Jahr 2022. Verglichen sind die Substratboden- (rechts) und die Dachoberflächentemperaturen (links) des maximal bewässerten Feldes (Diagramme links) und des unbewässerten Feldes (Diagramme rechts).

Der Vergleich der beiden Felder zeigt einen erheblichen Unterschied der Temperaturprofile zwischen den beiden Feldern für den Monat August 2022. Die Spannweite der Temperaturschwankungen an der Substratoberfläche ist im unbewässerten Feld Fl.4 mit über 35°C (Min: 7°C, Max: 43°C) mehr als doppelt so hoch wie im maximal bewässerten Feld mit ca. 15°C (Min: 15°C, Max: 30°C). Auf dem Boden der Substratschicht sind die Unterschiede zwischen den beiden Feldtypen noch größer, die mittleren Amplituden für den Monat August 2022 belaufen sich hier auf ca. 13°C im maximal bewässerten Feld Fl.1 und ca. 35°C im unbewässerten Feld Fl.4. Auch die Amplitudenverschiebung ist an Hand der Tagesprofile gut erkennbar. So tritt das Minimum der Tagestemperatur in den bewässerten Feldern erst gegen 8-9 Uhr in den Morgenstunden auf, während es im unbewässerten Testfeld bereits zwischen 7-8 Uhr erreicht ist. Allerdings wird dieser Zeitverlauf zusätzlich von dem zeitverzögerten Strahlungseintrag durch das Gebäude beeinflusst. So ist während des Tagesganges des Sonnenstandes zuerst das am stärksten bewässerte Feld vom Schatten des Gebäudes

bedeckt, während die dahinterliegenden Felder noch etwas länger der Direktstrahlung ausgesetzt sind. In den Nachmittags- und Abendstunden ist der Effekt identisch. Daher ist mit einem höheren Strahlungseintrag der weniger stark bewässerten Felder im Tagesgang zu rechnen. Dieser Effekt ist auch im gemittelten Tagesprofil des unbewässerten Feldes in Form eines Knicks des oberflächlichen Temperaturverlaufs zu erkennen. Die Unterschiede in den Extremwerten und die Amplitudenverschiebung sind infolgedessen wahrscheinlich höher als für ein frei beschienenes Dach und die Zeitpunkte der Maximalwerte sollten nicht ohne die Berücksichtigung dieses Verschattungseffektes interpretiert werden.

Ergänzend zur Auswertung der Temperaturverhältnisse ist in Abbildung 6.2-4 der aus den volumetrischen Feuchtemessungen der Hydraprobes für den Monat August 2022 gemittelte Tagesverlauf für die beiden Extremfälle, das maximal bewässerte Feld FI.1 und das unbewässerte Feld FI.4 aufgeführt.

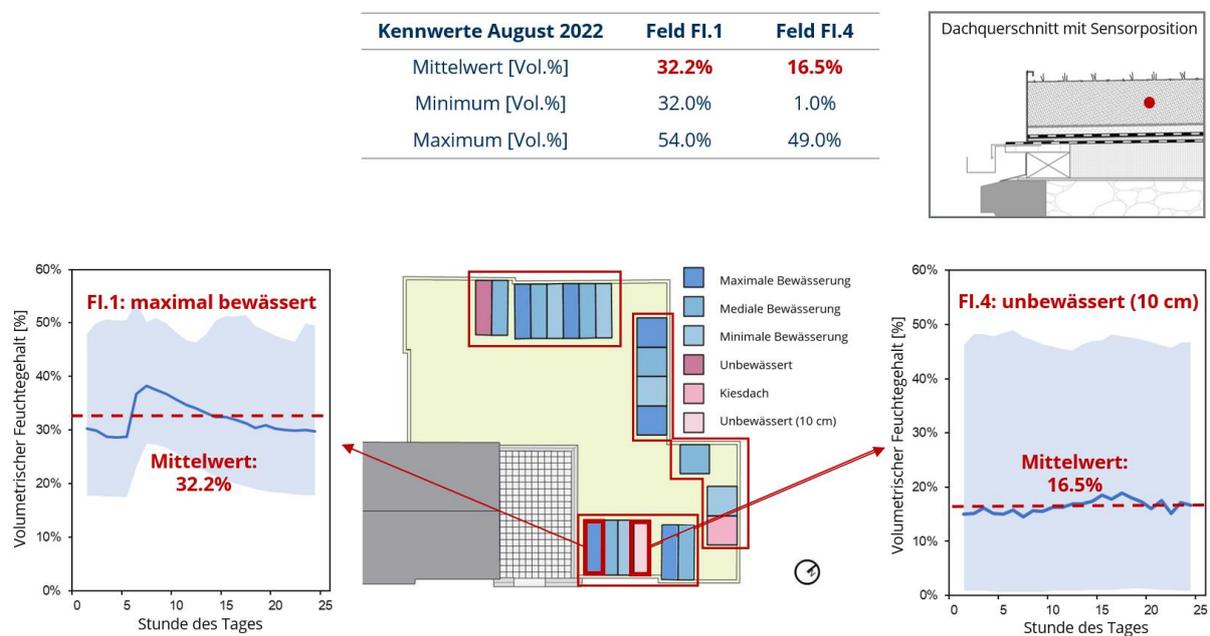


Abbildung 6.2-4: Feuchtegehaltmessungen der Hydraprobes für die volumetrische Feuchte in Feldmitte im Substrat für den Monat August 2022 im Vergleich des maximal bewässerten Feldes (links) und des unbewässerten Feldes (rechts).

Es ist zu erkennen, dass der mittlere volumetrische Feuchtegehalt mit 32.2 Vol.-% im stark bewässerten Feld fast doppelt so hoch ist wie im unbewässerten Feld mit 16.5 Vol.-%. Da Wasser eine etwa vierfach erhöhte spezifische Wärmespeicherkapazität im Vergleich zu Luft und üblichen Baustoffen aufweist ( $4.19 \text{ kJ/kgK}$  im Gegensatz zu  $\text{ca. } 1 \text{ kJ/kgK}$ ) und zusätzlich eine deutlich höhere Dichte hat, wirkt sich ein steigender Wassergehalt überproportional auf die thermische Speicherfähigkeit aus.

### 6.3. Abschätzung der ET-Kennwerte aus den Temperaturmessungen

Aus den Auswertungen der Temperaturprofilkennwerte waren Unterschiede in den Mittelwerten zu kennen. Da man vereinfachend davon ausgehen kann, dass die Randbedingungen (solare Strahlungseinträge, langwellige Strahlungsbilanz, Wind, Niederschlag) für alle Felder weitestgehend gleich sind, ist zu vermuten, dass die Temperaturabsenkung in den bewässerten Feldern maßgeblich auf die Kühlwirkung durch die Verdunstung in den Feldern zurückzuführen ist. Diese Verdunstung setzt sich aus der Verdunstung von der Substratoberfläche (Evaporation) und der Verdunstung über die Blattoberflächen (Transpiration) zusammen.

Als Kennwerte sind für diesen Vergleich der gespeicherten Wärmeenergie die Substrateigenschaften erforderlich (Dichte des trockenen Substrats:  $750 \text{ kg/m}^3$ , spezifische Speicherkapazität des trockenen Substrats:  $0.9 \text{ kJ/kgK}$ , Schichtdicke des Substrats in den Feldern FI.1 bis FI.3 :  $0.19 \text{ m}$ , in Feld FI.4 :  $0.10 \text{ m}$ . Der Wassergehalt kann aus den Hydraprobek-Messungen entnommen werden und beträgt damit für den August 2022 für Feld FI.1: 32.2 Vol.-%, Feld FI.2: 24.4 Vol.-%, Feld FI.3 18.9 Vol.-% und Feld FI.4 16.5 Vol.-%). Für eine Abschätzung des Unterschieds werden ferner Stoffkennwerte wie die Verdampfungsenthalpie des Wassers  $h_{\text{evap}, 20^\circ\text{C}} = 2453 \text{ [kJ/kg]}$  und deren Äquivalent  $28.36 \text{ [W/(mm)]}$  benötigt. Die Temperaturverhältnisse sind für diese vier Felder in den nachfolgenden beiden Abbildungen jeweils für den Substratboden (Abbildung 6.3-1) und für die Substratoberfläche (Abbildung 6.3-2) gegenübergestellt. Es ist daraus zu erkennen, dass sich im mittleren Temperaturkennwert mit zunehmender Bewässerung eine zunehmende Temperaturabsenkung zeigt. Diese ist in Feld FI.1 gegenüber Feld FI.2 mit ca.  $0,3^\circ\text{C}$  relativ gering, zwischen Feld FI.2 und Feld FI.3 mit ca.  $0,5^\circ\text{C}$  schon etwas höher und zwischen Feld FI.3 und FI.4 mit  $1,4^\circ\text{C}$  am höchsten. Dieses Verhältnis der Temperaturkennwerte entspricht auch näherungsweise den Differenzen in den Evapotranspirationsraten zwischen den Feldern (siehe vorheriger Abschnitt).

| Kennwerte August 2022           | Feld FI.1 | Feld FI.2 | Feld FI.3 | Feld FI.4 |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Mittelwert [ $^\circ\text{C}$ ] | 21,33     | 21,62     | 22,12     | 23,66     |
| Minimum [ $^\circ\text{C}$ ]    | 16,6      | 17,1      | 16,4      | 12,3      |
| Maximum [ $^\circ\text{C}$ ]    | 29,5      | 29,1      | 32,0      | 42,4      |

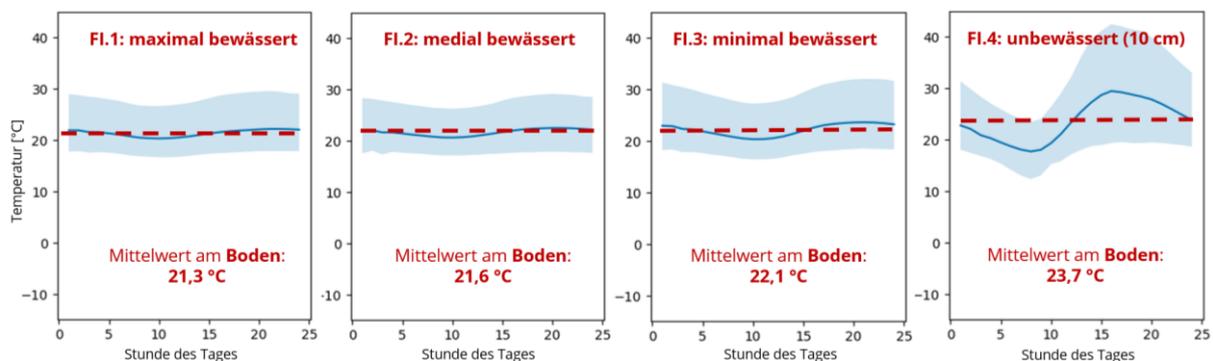
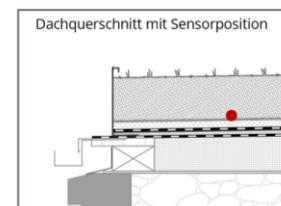


Abbildung 6.3-1: Übersicht der Temperaturmessungen aus den Lanzensensoren für August 2022. Verglichen sind die Temperaturen **am Boden** der vier unterschiedlich bewässerten Testfelder aus Gruppe I.

Die Temperaturverhältnisse am Boden des Substrates entsprechen nicht dem Mittelwert der gesamten Substratschicht. Daher ist in Abbildung 6.3-2 auch der Unterschied im mittleren Temperaturniveau für die Substratoberflächentemperaturen aufgeführt. Die Unterschiede betragen hier zwischen Feld Fl.1 und Feld Fl.2 mit ca. 0,9°C, zwischen Feld Fl.2 und Feld Fl.3 ca. 0,6 °C und zwischen Feld Fl.3 und Fl.4 1,6 °C. Sie zeigen damit grundsätzlich ähnliche Verhältnisse wie die Bodentemperaturen, wobei hier ein deutlich größerer Sprung zwischen dem maximal und dem medial bewässerten Feld vorliegt.

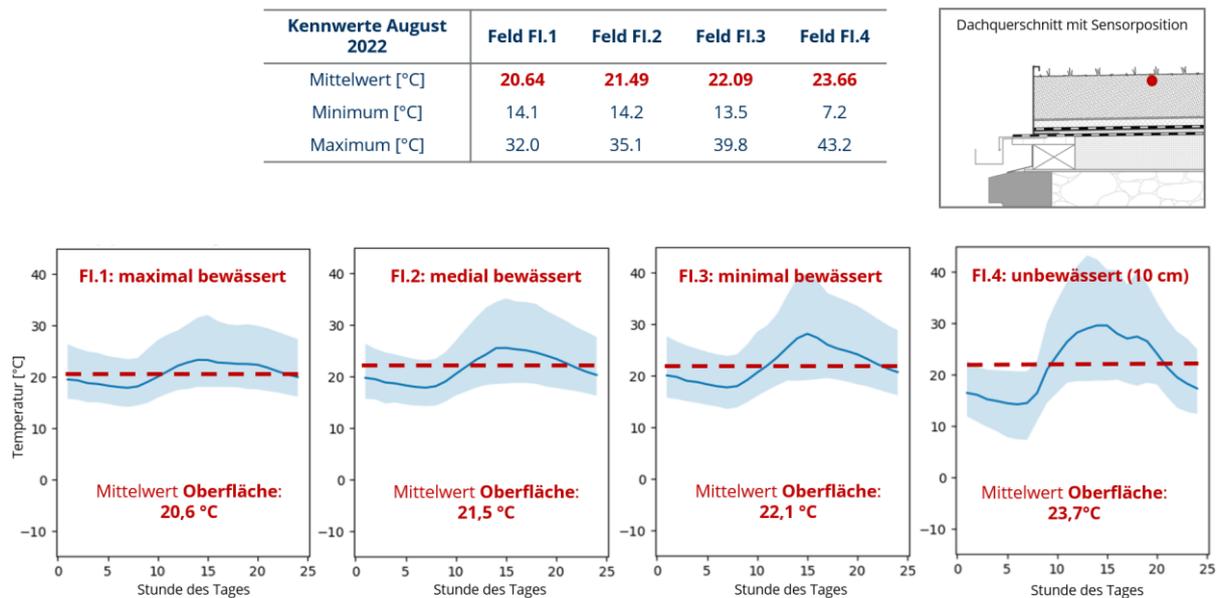


Abbildung 6.3-2: Übersicht der Temperaturmessungen aus den Lanzensensoren für August 2022. Verglichen sind die Temperaturen **an der Oberfläche** der vier unterschiedlich bewässerten Testfelder aus Gruppe I.

Daraus ergeben sich, zurückgerechnet und ohne Berücksichtigung der mikroklimatischen Unterschieden in den Regen- und Windverhältnissen sowie in den Strahlungseinträgen und -verlusten die in Tabelle 6-1 aufgeführten Differenzen in den Verdunstungsmassen.

Tabelle 6-1: Berechnungskennwerte für die Abschätzung der durchschnittlichen ET-Differenzen in den bewässerten Feldern Fl.1 bis Fl.3 gegenüber dem unbewässerten Feld Fl.4 für den Monat August 2022.

|                  | $C_{drySubs}$<br>[ $\frac{kJ}{K m^2}$ ] | $C_{Water}$<br>[ $\frac{kJ}{K m^2}$ ] | $C_{Gesamt}$<br>[ $\frac{kJ}{K m^2}$ ] | $\Delta\theta$<br>[K] | $\Delta Q_{Kühlung}$<br>[ $\frac{kWh}{m^2}$ ] | $\Delta ET$<br>[mm] |
|------------------|---|---------------------------------------|--|-----------------------|---|---------------------|
| <b>Feld Fl.1</b> | 128.3                                   | 255.7                                 | 384.0                                  | 2.4 K (21.3°C)        | 0.256   | 9.03                |
| <b>Feld Fl.2</b> | 128.3                                   | 198.8                                 | 322.1                                  | 2.1 K (21.6°C)        | 0.188   | 6.65                |
| <b>Feld Fl.3</b> | 128.3                                   | 149.8                                 | 278.0                                  | 1.6 K (22.1°C)        | 0.124   | 4.36                |
| <b>Feld Fl.4</b> | 128.3                                   | 130.8                                 | 259.0                                  | 0 K (23.7°C)          | 0.000   | 0.00                |

Daraus ist zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen den Feldern doch erheblich sind, auch wenn die mittleren Temperaturverhältnisse und Feuchtegehalte zum Teil geringe Abweichungen zeigen. Hier muss darauf hingewiesen werden, dass die klimatischen Randbedingungen in den Feldern nicht der eingangs vorgenommenen Vereinfachung entsprechen, d.h. nicht identisch sind. Der Schlagregeneintrag auf den weniger

bewässerten Feldern ist wahrscheinlich höher und der Strahlungseintrag ebenfalls. Der erste Punkt kann nicht geklärt werden, da hierfür zusätzliche Messungen oder Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen erforderlich wären. Der zweite Punkt kann zumindest in Bezug auf den kurzwelligigen Strahlungseintrag mit ergänzenden Simulationsrechnungen eingeschätzt werden. Hierfür wurden die Testfelder mit dem angrenzenden Gebäude in Energy Plus simuliert und es wurden die Strahlungseinträge im Verhältnis zu den an der Klimastation vorhandenen Globalstrahlungseinträgen für die einzelnen Testfelder ermittelt. Berücksichtigt sind dabei neben dem Gebäude selbst auch die Bäume und Sträucher zur Straße sowie zum Besucherbereich des Botanischen Gartens. Die Zusammenfassung der Abminderungsfaktoren ist in Abbildung 6.3-3 enthalten.

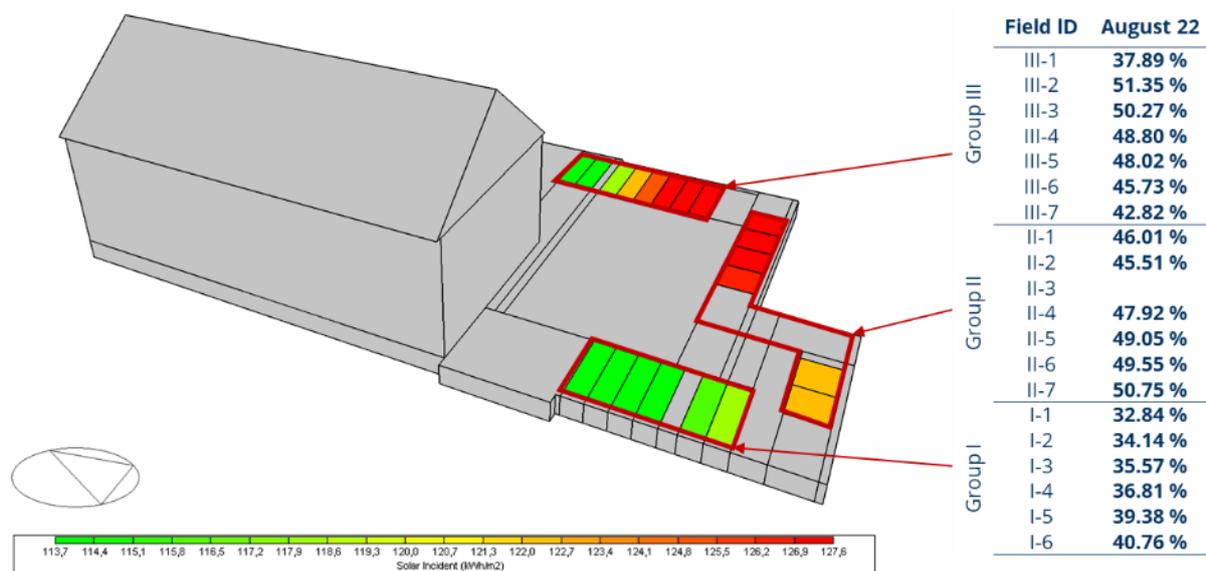


Abbildung 6.3-3: Ergebnis der Strahlungseintragssimulation für den Monat August 2022. Dargestellt ist der Anteil der Diffus- und Direktstrahlung (Globalstrahlung) im Verhältnis zur horizontal auftreffenden Globalstrahlung der Wetterstation.

Entgegen der initialen Annahme des Projektantrages, dass die weiter vom Gebäude entfernt befindlichen Testfelder einen geringeren Strahlungseintrag aufweisen, ist für diese Felder (Gruppe II und Gruppe III) ein höherer Globalstrahlungseintrag zu erkennen. Innerhalb der Feldgruppe I sind die Unterschiede gering.

Neben den Ursachen der mikroklimatischen Unterschiede durch das Gebäude gibt es auch auf der Oberfläche der Testfelder uneinheitliche Bedingungen. So bewirkt der unterschiedlich ausgeprägte Pflanzenbedeckungsgrad eine Abschattung der kurzwelligigen Strahlung einerseits, eine Reduktion der langwelligigen Abstrahlung andererseits. Diese Faktoren wirken sich ebenfalls auf die Energiebilanz aus. Das könnte auch erklären, warum das Verhältnis der Evapotranspirationsraten nicht dem hier überschlägig ermittelten Verhältnis der Speicherdiffferenz entspricht. Das Zusammenspiel dieser Effekte kann mit den vorliegenden Messdaten nicht quantifiziert werden. Hier könnten hygrothermische Simulationen der begrünten Dachoberfläche Klarheit bringen.

## 6.4. Wärmestrommessungen

Ein oft angeführtes Argument für die Umsetzung von Gründächern ist die Auswirkung auf die Wärmeverluste der Dach-Konstruktion, beispielsweise in (PEROVIC u. a. 2023; BORRÀS u. a. 2022; BEVILACQUA, BRUNO, und ARCURI 2020; GHOLAMI u. a. 2020; MORAKINYO u. a. 2017; BATTISTA u. a. 2016). Es wird häufig argumentiert, dass die zusätzliche Substratschicht eine Verringerung der Wärmeströme bewirkt, im Sommer der positiven Wärmeströme in das Gründach hinein (Transmissionswärmeeinträge in den darunterliegenden Raum) und im Winter der negativen Wärmeströme aus der Dachkonstruktion in die Umgebung (Transmissionswärmeverluste des darunterliegenden Raumes).

Um diese Vermutung zu untersuchen, wurden Wärmestrommessungen in drei unterschiedlichen Feldern, Feld FI.4, Feld FI.5 und Feld FI.6 an jeweils zwei Positionen, in der Drainageebene und der Substratebene, durchgeführt. Dabei handelt es sich bei Feld FI.4, um das unbewässerte Feld mit geringem Schichtaufbau, in Feld FI.5 um ein maximal bewässertes Feld und bei Feld FI.6 um ein medial bewässertes Feld. Es stand zu vermuten, dass sich die Feuchtegehalte in den Feldern FI.5 und FI.6 vergleichbar zu den Feldern FI.1 und FI.2 verhalten würden, da in diesen jeweils das gleiche Bewässerungsregime vorhanden war. Zur Überprüfung wurden diese Kennwerte für den August 2022 in Abbildung 6.4-1 gegenübergestellt.

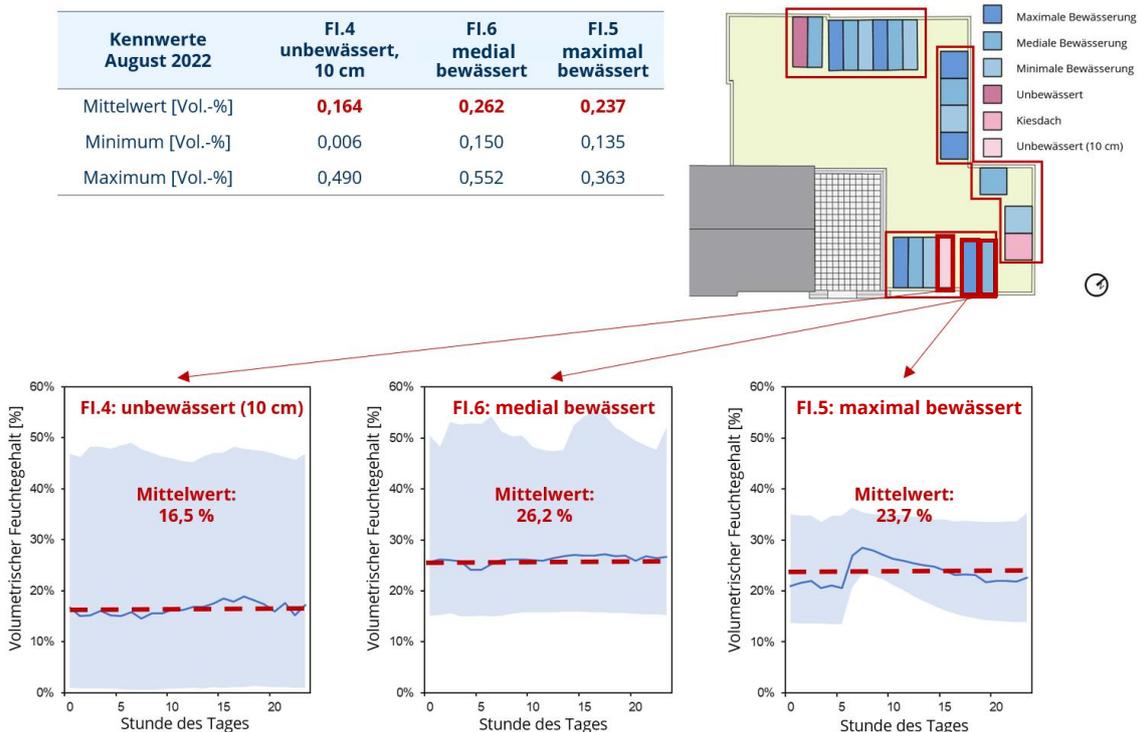


Abbildung 6.4-1: Ergebnis der volumetrischen Feuchtegehaltmessungen der Hydraprobes in den Feldern FI.4, FI.5 und FI.6 für August 2022. Es ist zu beachten, dass die Reihenfolge entsprechend der Bewässerungsintensität aufgeführt ist, d.h. Feld I-5 und Feld I-6 sind gegenüber der geometrischen Anordnung vertauscht.

Erstaunlicherweise entsprechen die gemessenen Feuchtegehalte nicht der Erwartung. Das maximal bewässerte Feld (Feld FI.5) erweist sich als verhältnismäßig trocken gegenüber dem medial bewässerten Feld (FI.6). Auch die Temperaturen bestätigen diese Relation, Feld FI.6 zeigt höhere Mittelwerte als Feld FI.5.

In Abhängigkeit des sich einstellenden Wassergehaltes bietet das Substrat einen erheblichen Speichereffekt, der sich auf die Amplitudendämpfung und die Amplitudenverschiebung der Temperaturen in der Konstruktion gegenüber der Außenlufttemperatur auswirkt. In welchem Maße diese thermische Pufferwirkung auch einen Einfluss auf die entstehenden Wärmeströme nimmt, soll daher näher ausgeführt werden. Dazu sind im weiteren Verlauf die drei Felder FI.4 bis FI.6 für das Jahr 2022 in Abbildung 6.4-2 und im späteren Verlauf des Abschnitts für zwei ausgewählte Monate im Sommer und im Winter des gleichen Jahres dargestellt.

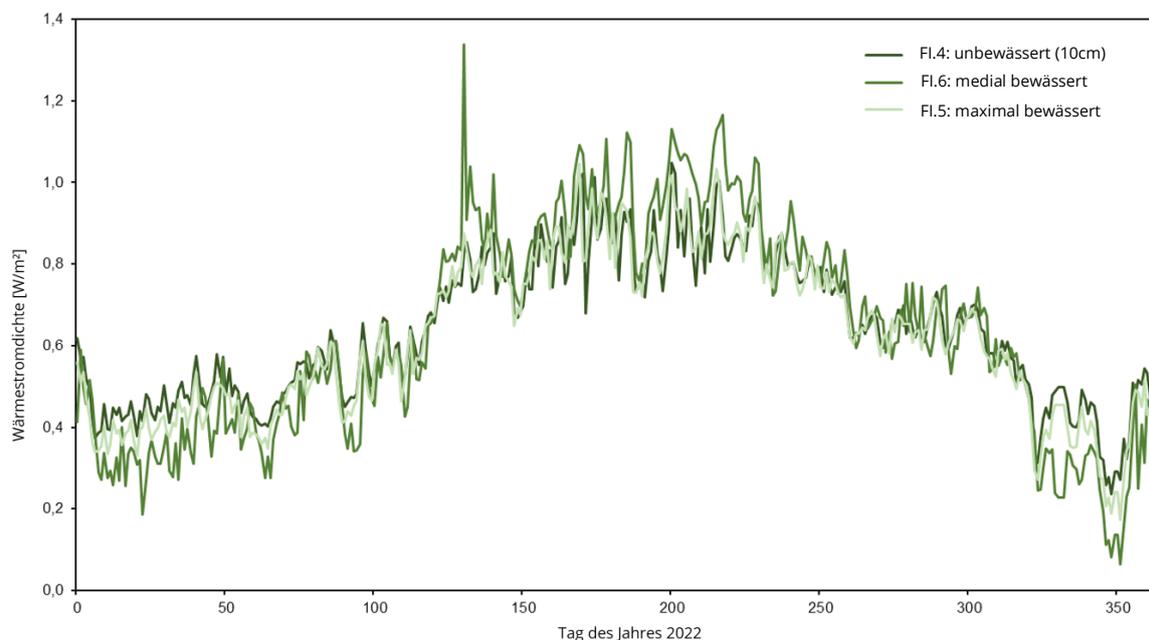


Abbildung 6.4-2: Ergebnis der Wärmestrommessungen für die Felder FI.4, FI.6 und FI.5 am Boden der Substratschicht des Gründachs für das gesamte Jahr 2022. Zur besseren Interpretierbarkeit sind die Tagesmittelwerte und nicht die Stundenwerte abgebildet.

Im Verlauf der Wärmestrommessungen ist zu erwarten, dass der Betrag des Wärmestroms mit zunehmender Differenz zwischen der Raum- und der Außenluft ansteigt. Das ist nicht der Fall. Es zeigt sich ein umgekehrter Verlauf mit Wärmeströmen, die zur Jahresmitte zunehmen. Das passiert, obwohl sich die Substrattemperatur dann immer höher ist und nah an der zu vermutenden Raumlufttemperatur des darunterliegenden Raumes liegt. Damit würde der Temperaturgradient als Antrieb des Wärmestroms immer geringer. So kann als Gradient zwischen Dachkonstruktion und Raumluft während des Winters mit ca. 15 bis 20 K für den Sensor auf der Oberfläche der Dämmschicht gerechnet werden, wenn man davon ausgeht, dass die Temperatur in der

Dämmschicht etwa der Temperatur auf dem Boden der Substratschicht (siehe Auswertung Temperaturmessungen im vorherigen Abschnitt) entspricht. Die außenseitige Temperatur in der Dachkonstruktion betrüge dann durchschnittlich etwa 5°C, während die Raumlufttemperatur im Gebäude bei ca. 20°C liegen müsste. Letztere wurde leider nicht messtechnisch erfasst. Während des Sommers kann von ähnlichen, ggf. leicht höheren Raumlufttemperaturen (20-25°C) ausgegangen werden. Die außenseitigen Temperaturen wären dann jedoch auf dem gleichen Niveau oder leicht darüber, wie in den Tagesprofilen gezeigt wurde. Es ergäbe sich daraus ein Gradient von höchstens -10 K, eher -5 K. Damit müssten die Wärmestromdichten im Sommer kleiner als im Winter sein. Zusätzlich müssen sie sich dem Betrag nach umkehren. Der Verlauf zeigt sich jedoch gegenteilig. Zur Interpretation der Wärmestrommessungen wurden nachfolgend die typischen Tagesprofile, jeweils für einen Sommermonat und einen Wintermonat, sowie für die drei unterschiedlich bewässerten Felder mit Wärmestromsensorik aufgeführt (Abbildung 6.4-3 und Abbildung 6.4-4).

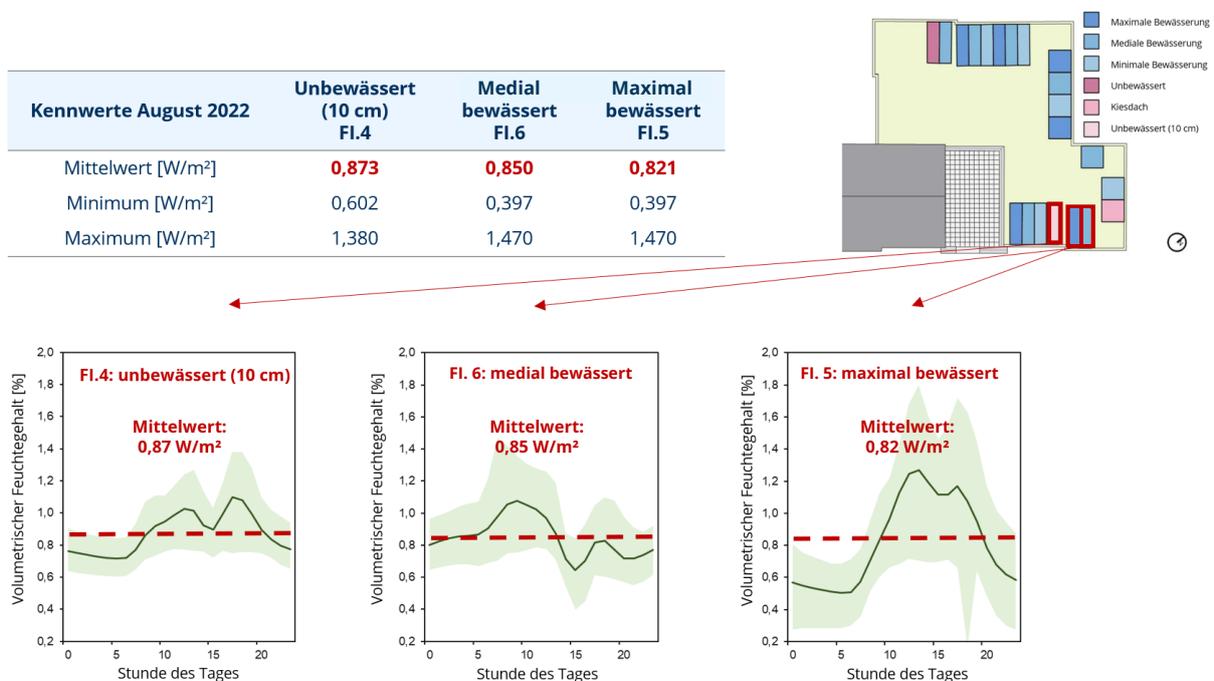


Abbildung 6.4-3: Ergebnis der Wärmestrommessungen für die Felder Fl.4, Fl.5 und Fl.6 in der Substratebene des Gründachs für August 2022.

Die Darstellung der typischen Wärmestromprofile während des Sommers zeigt mit 0,1 bis 1,8 W/m<sup>2</sup> betragsmäßig höhere Wertebereiche als der Winter mit 0 bis 0,9 W/m<sup>2</sup>. In beiden Fällen ist der Unterschied zwischen den Feldern in Bezug auf die Tagesmittelwerte sehr gering, im Sommer noch geringer als im Winter. Damit sind die Wärmestromdichten in Bezug auf die Verhältnisse der Mittelwerte (Sommer-Winter, mediale-keine Bewässerung) und in Bezug auf die Tagesschwankungen nicht plausibel und stellen jeweils das Gegenteil des Erwartungswertes dar. Die Wärmestromprofile sind ebenfalls gegensätzlich zu den Erkenntnissen aus den Temperatur- und volumetrischen Feuchtegehaltsprofilen. Denn je stärker die Bewässerung ist, desto ausgeglichener zeigten sich die Temperatur-

verhältnisse (Abbildung 6.3-2), was sich auch in ausgeglicheneren Wärmestromdichten widerspiegeln müsste. Demnach müsste das am stärksten bewässerte Feld (Fl.5 maximal bewässert) auch das Wärmeprofil mit der geringsten Tagesamplitude, d.h. mit der geringsten Differenz zwischen Tagesminimal- und Tagesmaximalwert, aufweisen. Das ist nicht der Fall, wie in Abbildung 6.4-4 zu erkennen ist. Ebenso zeigen sich im Tagesprofil die höchsten Kennwerte sowohl im Winter als auch im Sommerfall in Tagesmitte. Zu dieser Zeit liegt jedoch die Substrattemperatur sehr nah an der anzunehmenden Raumlufttemperatur, d.h. es müssten dann die geringsten Wärmestromdichten gemessen werden.

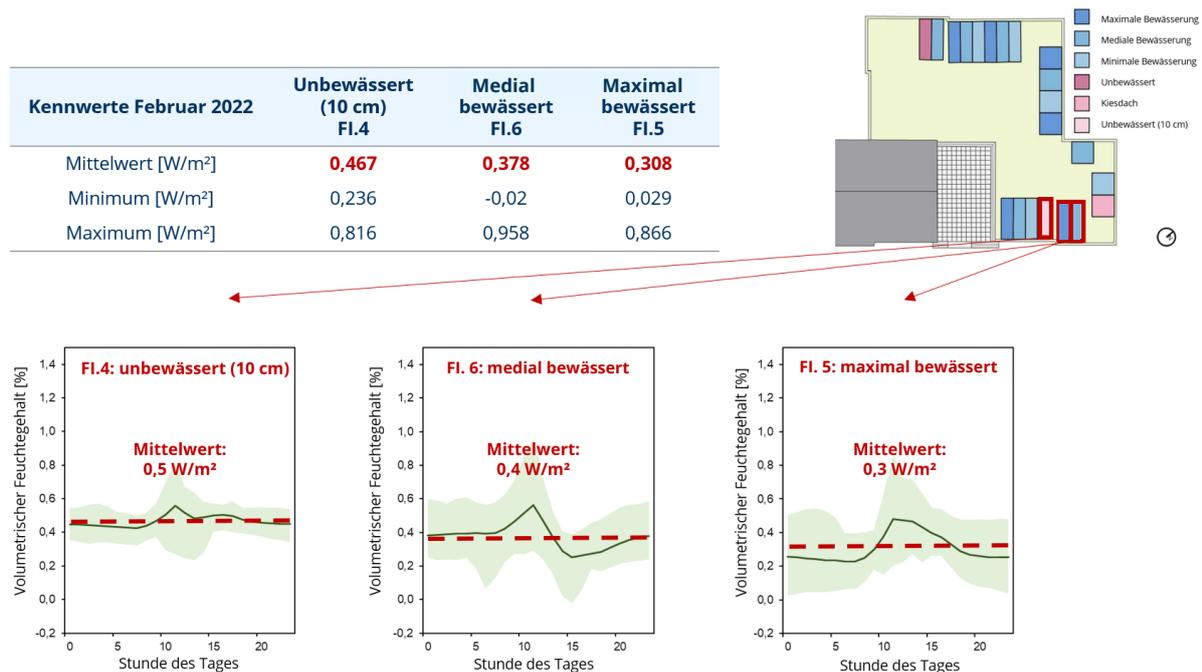


Abbildung 6.4-4: Ergebnis der Wärmestrommessungen für die Felder Fl.4, Fl.5 und Fl.6 in der Substratebene des Gründachs für Februar 2022.

Eine mögliche Erklärung hierfür ist der Wertebereich der Sensoren für die Wärmestrommessungen. Als Grenze ist für den Sensor der Wärmestromdichte ein Bereich von über 1 W/m<sup>2</sup> angegeben. Darunter sind, laut Hersteller „non stability“-Bereiche vorhanden, d.h. nicht interpretierbare Schwankungen der Messsignale<sup>2</sup>. Aus den Jahresmessungen ist zu erkennen, dass dieser Wertebereich lediglich im Sommer kurzzeitig überschritten wird. Damit könnte eine Interpretation der Messergebnisse allenfalls für diesen Sommer-Zeitraum erfolgen. Als weitere Fehlerursache für die Wärmestrommessungen kommen auch Messfehler in Folge eines nicht fachgerechten Einbaus in Frage. So könnte es zu Wärmeleitungsvorgängen über die Verkabelung der eingebauten Sensoren kommen. Da der Einbau nicht dokumentiert ist, kann diese Fehlerursache nicht überprüft werden.

<sup>2</sup>Sensorspezifikation Hukseflux Wärmestrom-Messplatte HFP01, Manual Version 2124, 45 Seiten, Quelle: [https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/HFP01\\_HFP03\\_manual\\_v2124\\_0.pdf](https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/HFP01_HFP03_manual_v2124_0.pdf)

Auf Grund der unplausiblen Messwerte soll der Einfluss der Bewässerungsform auf die Wärmeverluste des Gründachs während des Winters zunächst auf der Grundlage der gemessenen Temperaturprofile betrachtet werden. Diese Überlegungen zum allgemeinen Einfluss von Gründachkonstruktionen auf die Wärmeverluste bzw. Wärmeeinträge hängen unmittelbar mit dem U-Wert der bestehenden Dachkonstruktion zusammen. Nach GEG 2020 bzw. 2023<sup>3</sup> ist bei jeglicher flächigen Veränderung an Außenbauteilen der Nachweis über die Einhaltung von minimalen U-Werten zu erbringen. Demzufolge muss für deutsche Konstruktionen davon ausgegangen werden, dass das Dach beim Aufbringen einer Gründach-Konstruktion immer GEG-konform gedämmt ist. Auch eine Ausnahmeregelung gemäß §105 GEG 2023 bei Denkmälern ist in diesem Fall nicht begründbar, da bei Vorhandensein baulicher Voraussetzungen für Gründächer (statisch, konstruktiv) immer auch die Voraussetzungen für das Aufbringen von Dämmung gegeben sind. Bei Dachkonstruktionen mit flächigen Abdichtungen liegt der nach GEG geforderte U-Wert bei 0,2 W/m<sup>2</sup>K (siehe Anlage 7 zu §48, GEG 2023). Der Einfluss der übrigen Konstruktionsschichten ist, im Vergleich zu diesem geforderten Widerstand der Dämmschicht, marginal und bewegt sich etwa bei einem Zwanzigstel des gesamten Durchgangswiderstands des Daches. Ein Effekt des Gründach-Konstruktionsaufbaus muss vor diesem Hintergrund betrachtet werden und eine Unterscheidung von sommerlichen und winterlichen Klimabedingungen beinhalten.

Während des Winters bewegen sich die Temperaturen der Gründachkonstruktionen im Bereich der Außenlufttemperatur, zeigen sich jedoch deutlich ausgeglichener. Wie im oberen Abschnitt bereits ausgeführt wurde, kann für diesen Winterfall mit Temperaturgradienten von 15 bis 20 K gerechnet werden, wodurch sich Wärmeverluste über die Dachkonstruktion ergeben. Diese Wärmeverluste sind, da die Außenlufttemperatur permanent unter der Raumlufttemperatur liegt, immer vorhanden. Aus diesem Grund wird für Winterphasenbetrachtungen in der Bauphysik die Vereinfachung getroffen, zeitliche Verläufe zu vernachlässigen, es werden so genannte stationäre Betrachtungen angestellt. Unter Annahme dieser Vereinfachung ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Speicherfähigkeit keine Rolle spielt und einzig der Wärmedurchlasswiderstand bzw. dessen Kehrwert (U-Wert) einer Konstruktion maßgebend ist. Da dieser vorwiegend von der Dämmwirkung bestimmt wird und das Substrat eine feuchtegehaltsabhängige Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,4 bis 1,2 W/mK (siehe Abbildung 35, S. 112 Zwischenbericht) gegenüber einem Kennwert von 0,035 für Dämmstoffe aufweist, ist der prozentuale Anteil des Gründachs auf die Wärmeverlustverringerung des gesamten Daches nur ein geringer Bruchteil dessen, was die Dämmebene leistet. Anders formuliert kann man daraus schlussfolgern, dass das Ersetzen von Gründachschichten mit Dämmschichten für den Winterfall immer

---

<sup>3</sup> Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden\* (Gebäudeenergiegesetz - GEG) Anlage 7 (zu § 48) Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten von Außenbauteilen bei Änderung an bestehenden Gebäuden, Quelle: [https://www.gesetze-im-internet.de/geg/anlage\\_7.html](https://www.gesetze-im-internet.de/geg/anlage_7.html)

vorteilhafter wäre, da die Wärmeleitfähigkeit des Substrates etwa um das 20-fache höher ist als die Wärmeleitfähigkeit eines typischen Dämmstoffes.

Für den Sommerfall herrschen andere Randbedingungen als im Winter und auch hier soll auf der Grundlage der gemessenen Temperaturprofile erläutert werden, welchen Effekt das Gründach auf den Energiebedarf, in diesem Fall den Kühlenergiebedarf, nimmt. Im Sommer kann nicht von stationären Bedingungen ausgegangen werden, d.h. hier ist die Speicherfähigkeit der Konstruktion entscheidend. Während des Sommers sind während der Tagesstunden hohe Strahlungs- und damit Wärmeeinträge vorhanden. In einer ungedämmten Konstruktion würden diese dazu führen, dass sich die Dachkonstruktion aufheizt und diese Wärme während der Nachtstunden, wenn die Umgebungstemperaturen absinken, an die Umgebung und an den unter dem Gründach liegenden Raum abgibt. Diese Wärmeströme wären betragsmäßig sehr hoch und können bei harten dunklen Dachbelägen und ungedämmten Konstruktionen in der Größenordnung von  $30 \text{ W/m}^2$  liegen. Sind die Dachkonstruktionen begrünt und weisen eine höhere Schichtdicke auf, so findet eine Wärmespeicherung bereits in dieser Schicht statt, was zu ausgeglicheneren Temperaturen auf der Dachhaut führt und in Folge der helleren Oberfläche auch zu geringeren Strahlungseinträgen. Ist das Gründach trocken, so verringert sich der Speichereinfluss und es erhöht sich die Dämmwirkung der Gründachsubstratschicht. Ist das Gründach feucht, z.B. in Folge einer Bewässerung, so wird der Speichereffekt dominant und die Dämmwirkung nimmt ab. Im ersten Fall wären die Wärmeeinträge während des Tages in Folge der Dämmwirkung reduziert, im zweiten Fall in Folge der Ausgleichswirkung der Speichermassen (Reduktion und Verschiebung der Temperaturamplitude). In beiden Fällen würden sich aus eben diesen Gründen auch während der Nacht geringere Wärmeströme ergeben. Sind die Nachttemperaturen der Außenluft deutlich geringer als die Raumlufttemperatur, dann würden diese Wärmeströme Wärmeverluste des Raumes darstellen. In jedem Fall ist es so, dass diese Verringerung der Wärmeströme durch ein trockenes oder feuchtes Gründach das Überhitzungsrisiko verringert und bei gekühlten Räumen einen geringeren Kühlenergiebedarf bedeutete. Beim bewässerten Gründach wird dieser Effekt zusätzlich verstärkt, weil die Evapotranspiration eine zusätzliche Kühlwirkung mit sich bringt. Beim unbewässerten Gründach kann, da die Pflanzen während der heißen Sommerphasen üblicherweise nicht mehr vital sind, nicht davon ausgegangen werden, dass dieser Effekt relevant ist. Ein Ersetzen der vorhandenen Konstruktionstärke mit einem Gründach anstelle einer Dämmschicht, ist für diesen Fall anders zu bewerten. Ist das Gründach eine sehr gut speicherfähige Konstruktion, d.h. weist einen hohen Wassergehalt auf, und ist die Tagesmitteltemperatur der Außenluft entsprechend gering, d.h. unter der sommerlichen Solltemperatur der Raumluft, dann wäre ein bewässertes Gründach gegenüber einer Dämmschicht tatsächlich vorteilhafter. Es würde im Tagesmittel zu geringeren Wärmeströmen führen als eine Dämmschicht. Für unbewässerte Gründächer ist dieser Effekt nicht zu erwarten. Die in der Literatur fälschlicherweise kursierende Annahme, ein Gründach würde grundsätzlich Vorteile gegenüber einer Dämmschicht

aufweisen ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass diesen Untersuchungen unzutreffende Modellannahmen zu Grunde liegen. So wurden beispielsweise in (BORRÀS u. a. 2022) sowohl die Speicherfähigkeit als auch die Evapotranspirationsraten aus dem in EnergyPlus implementierten Modell angenommen, welches bodenphysikalische Bedingungen und folglich permanente Wasserverfügbarkeit voraussetzt. Aus der Literatur ist bekannt, dass diese Modelle eine Überschätzung der Evapotranspirationsraten für extensive Begrünung, sowie eine Unterschätzung für intensive Begrünung bedeuten, so auch dargelegt in (CASONE u. a. 2019; JAHANFAR u. a. 2018). Eine ergänzende Modellierung der Wasserverfügbarkeit, auch basierend auf der gewählten Bewässerungsform des Gründachs, wäre für sowohl für rein thermische Betrachtungen (Speicherfähigkeit, Dämmwirkung) als auch für hygrothermische Betrachtungen (ET-Potenzial) unbedingt notwendig, um daraus verlässliche Erkenntnisse zum Einfluss der Gründachkonstruktion auf den Kühl- oder Heizenergiebedarf ziehen zu können. Dieser Forschungsbedarf könnte sehr gut auf der Grundlage der in diesem Projekt gewonnenen und aufbereiteten Messdaten erfolgen. Die geeigneten Softwareanwendungen existieren bereits auf Bauteilebene (GRUNEWALD u. a. 2023; KÜNZEL, SCHMIDT und ZIRKELBACH 2023). Zum Teil sind darin auch schon Modelle für Gründächer enthalten, welche um die Wasserverfügbarkeit erweitert werden könnten, siehe (ZIRKELBACH 2017).

## 7. Stadtklimatische Bewertung des Kühlpotenzials (Arbeitspaket 5)

### 7.1. Datengrundlage und Methodik der Datenauswertung



(Karte: GoogleEarth)

Abbildung 7.1-1: Lage des Gründachs (1) am Verwaltungsgebäude des Botanischen Gartens sowie der Klimastation (2, Projekt MIW, TUD) und der Referenzstationen (3, LHD, DWD).

Zur mikroklimatischen Bewertung des Gründachs werden Daten der im Rahmen des Projektes installierten Klimastation sowie als Referenz Messdaten der Landeshauptstadt Dresden (LHD) bzw. des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ausgewertet. Die Abbildung 7.1-1 zeigt die Lage der Klimastationen im Umfeld des Gründachs im Botanischen Garten.

Die Messdaten der Klimastation am östlichen Rand des Gründachs (Abbildung 7.1-2) werden seit Mai 2020 kontinuierlich aufgezeichnet. Der Infrarotsensor am Verwaltungsgebäude liefert seit August 2021 (Abbildung 7.1-3) im 10-Minuten-Abstand hochaufgelöste Rasterdaten (1024x768 Bildpunkte) der Strahlungstemperatur des Messfeldes. Beide Sensorequipments dienen der mikroklimatischen Bewertung des Gründachs, insbesondere der Bereiche mit differenzierter Grauwasserbewässerung (Felder Fl.1 bis Fl.6, Abbildung 7.1-4).

Zur Einordnung der Repräsentativität der Klimastation wurden zusätzlich Vergleichsdaten der ca. 50 m entfernten Grasstationen der Landeshauptstadt Dresden (LHD) bzw. des Deutschen Wetterdienstes (DWD, Abbildung 7.1-5) ausgewertet.

Die als Minutenmittelwerte erfassten Daten der Klimastation wurden auf unplausible Messdaten und Datenlücken geprüft und entsprechend korrigiert. Zu Vergleichszwecken mit den Referenzstationen des DWD bzw. der LHD wurden die Daten zu 10-Minuten, Stunden- und Tagesmittelwerten aggregiert. Die Auswertung erfolgt für die Klimadaten in Form von Zeitgraphiken und Häufigkeitsverteilungen (Boxplots) der Absolutwerte bzw. der Unterschiede zur Referenzstation.

Folgende Bezugsperioden wurden abhängig von der Art des Messwertvergleiches und der Messgröße betrachtet:

- Mai 2020- Februar 2023: Zeitraum der Datenerfassung der Klimastation
- Januar 2022-Juli 2022: Vergleich mit Referenzstation bzgl. Temperatur, Feuchte, Strahlung und Wind
- August 2021 – September 2022: Infrarot-Temperaturdaten, gesamtes Messfeld
- Juni–September 2022: Infrarot-Temperaturdaten, Felder Fl.1-I bis 1-VI



Abbildung 7.1-2: Klimastation im Projekt MIW.

Die Bepflanzung der Unterlage erfolgt analog zur Bepflanzung des Gründachs. Die Messgrößen sind: 1 kurzwellige Globalstrahlung und Reflexstrahlung, langwellige Abstrahlung und Gegenstrahlung, 2 Temperatur und Feuchte, 3 Windrichtung und Windgeschwindigkeit, 4 Niederschlag (Fotos: V. Goldberg, 05.05.2022, 15.02.2021)

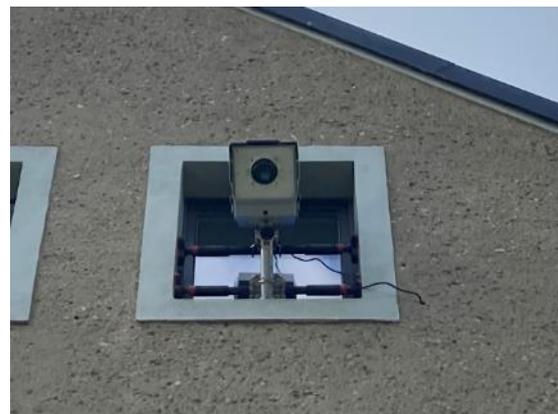


Abbildung 7.1-3: Position und Ausrichtung des Infrarotsensors am Verwaltungsgebäude des Botanischen Gartens. Das Messfeld entspricht etwa dem Fotoausschnitt in Abbildung 7-4 (Foto: V. Goldberg, 11.08.2021 und 07.09.2022).



Abbildung 7.1-4: Östlicher Teil des Gründachs mit den Feldern mit differenzierter Grauwasserbewässerung. Die Felder Fl. 1-I bis 1-VI stehen im Fokus der Auswertung der Daten des Infrarotsensors. (Foto: V. Goldberg, 25.08.2022).



Abbildung 7.1-5: Automatische Klimastationen der Landeshauptstadt Dresden (rechts) und des Deutschen Wetterdienstes (links), 50 m südöstlich des Gründachs im Botanischen Garten (Foto: V. Goldberg, 25.08.2022).

## 7.2. Analyse der stationären Klimamessung

### 7.2.1. Witterungsverlauf in der aktiven Messphase des Projektes

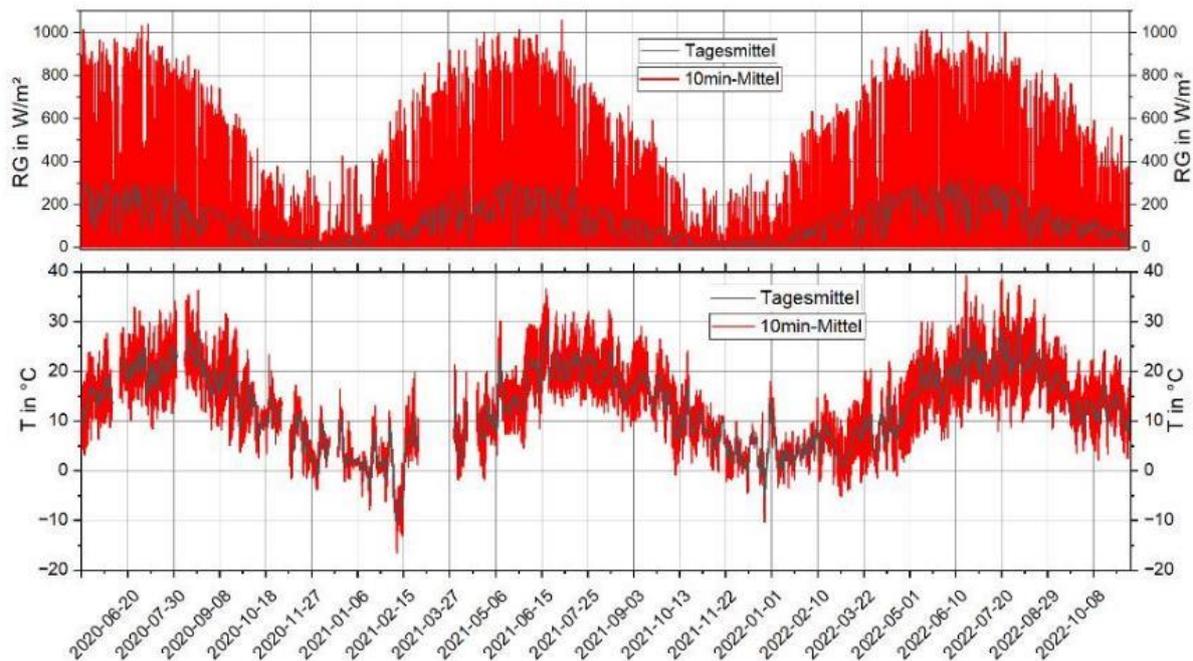


Abbildung 7.2-1: Verlauf von Lufttemperatur und Globalstrahlung an der Klimastation, Mai 2020-November 2022.

Der Witterungsverlauf gestaltete sich in den Jahren der Projektphase unterschiedlich. Während im Jahr 2021 relativ niederschlagsreiche und temperaturnormale Bedingungen vorherrschten, waren die Jahre 2020 und 2022 zu warm und zu trocken. So gab es im Sommer 2022 deutlich mehr Hitzeperioden mit einer höheren Anzahl von heißen Tagen (Abbildung 7.2-1).

Besonders große Unterschiede traten dabei in der Vegetationsperiode zwischen den Jahren 2021 und 2022 auf. In Tabelle 7-1 sind die wesentlichen Klimagrößen für den Zeitraum April-August 2021 und 2022 an der Station Dresden-Klotzsche aufgeführt.

Tabelle 7-1: Klimawerte der Periode April-Oktober 2021 und 2022 in Dresden-Klotzsche.

|   | 2021 | 2022 | 1991-2020 |
|---|------|------|-----------|
| <b>Temperatur (°C)</b>  | 14,4 | 15,8 | 14,8      |
| <b>Niederschlag (mm)</b>  | 503  | 338  | 426       |
| <b>Sonnenstunden</b>  | 1302 | 1565 | 1375      |
| <b>Heiße Tage (<math>T_{\max} &gt; 30^{\circ}\text{C}</math>)</b> | 4    | 17   | 9,5       |

Deutlich erkennbar ist, dass die Periode im Jahr 2021 im Vergleich zum langjährigen Mittel kühl, nass und sonnenscheinarm war. Im Kontrast dazu war das Jahr 2022 zu warm, zu trocken und deutlich zu sonnenscheinreich. Dies hatte Auswirkungen auf die Unterschiede im Pflanzenbewuchs der bewässerten und unbewässerten Flächen auf dem Gründach. Die Werte der Referenzstation werden durch die Messdaten für 2021 und 2022 an der Klimastation Botanischer Garten bestätigt. Auch im Botanischen Garten war das Jahr 2021 relativ feucht, kühl und sonnenscheinarm und das Jahr 2022 zu warm, zu

trocken und mit höherer solarer Einstrahlung als im Klimadurchschnitt (Abbildung 7.2-2 und Abbildung 7.2-3). Die Auswertung der Windmessung der Gesamtperiode sowie der Vergleich mit den Daten der Referenzstation (s.u.) zeigen einen stark abschirmenden Einfluss der unmittelbaren Umgebung der Klimastation (Bäume und Gebäude) auf die Häufigkeit der Windrichtung (Abbildung 7.2-4).

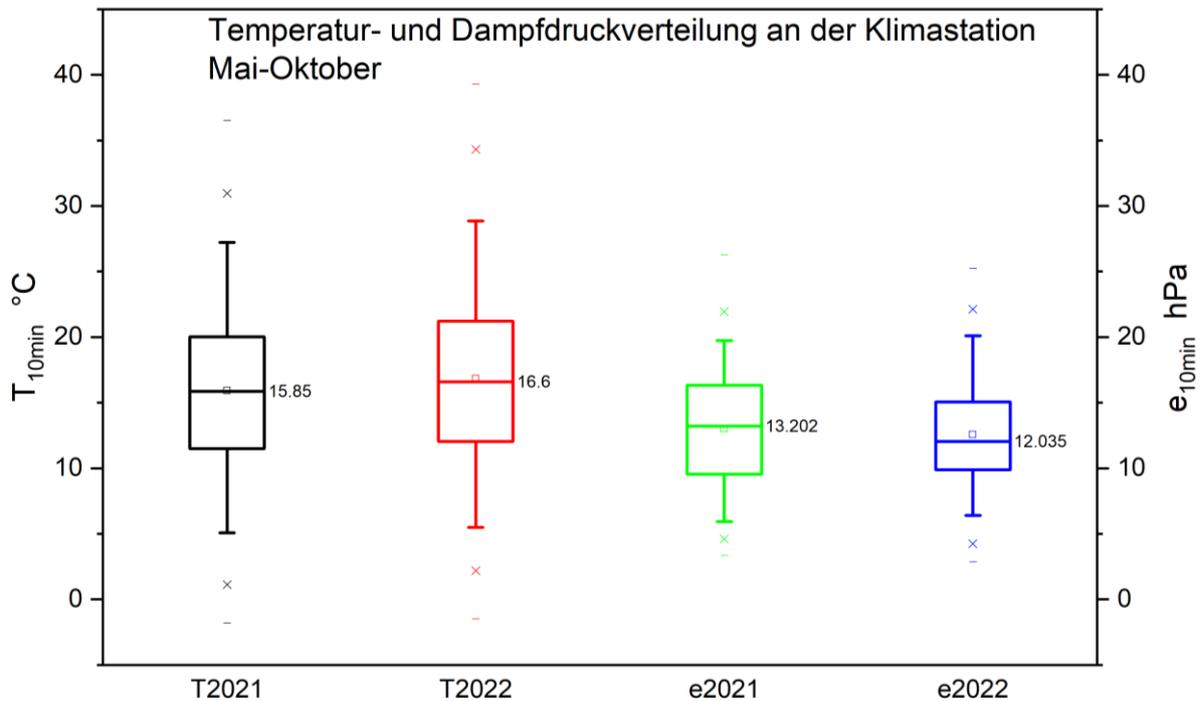


Abbildung 7.2-2: Häufigkeitsverteilung von Temperatur und Dampfdruck an der Klimastation Gründach von Mai-Oktober der Jahre 2021 und 2022.

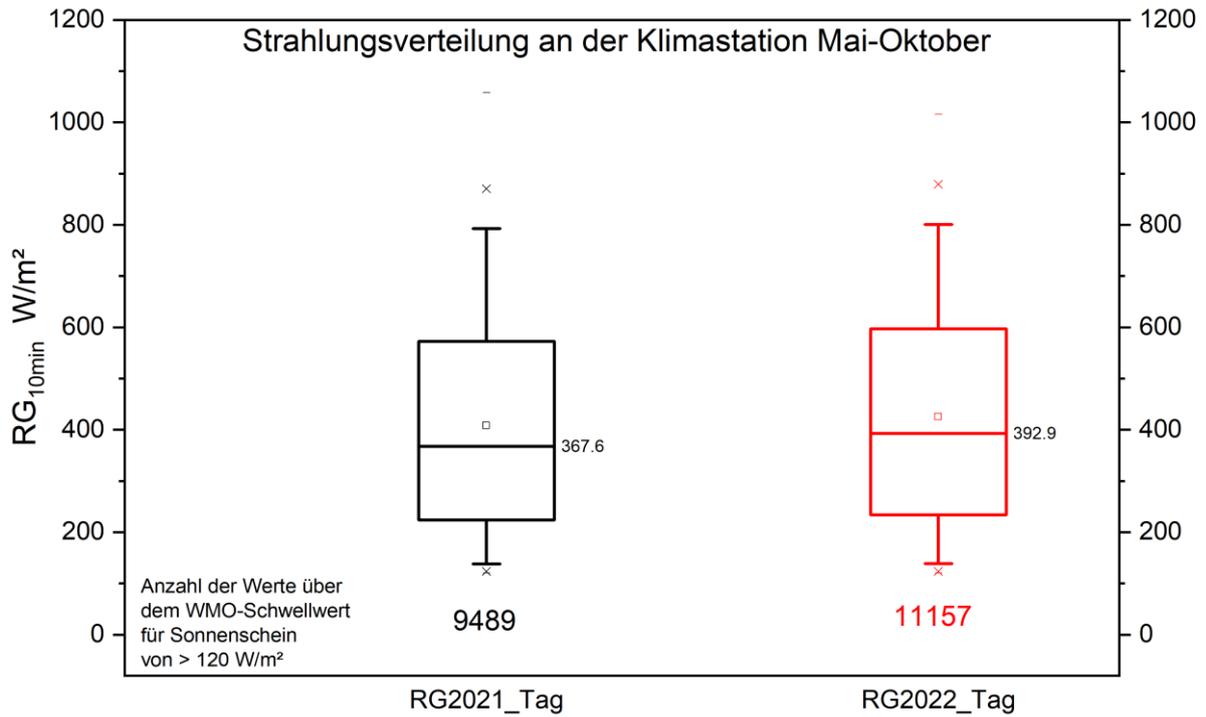


Abbildung 7.2-3: Häufigkeitsverteilung der Globalstrahlung (10min-Mittelwerte) und der relativen Sonnenscheindauer an der Klimastation Gründach von Mai-Oktober der Jahre 2021 und 2022.

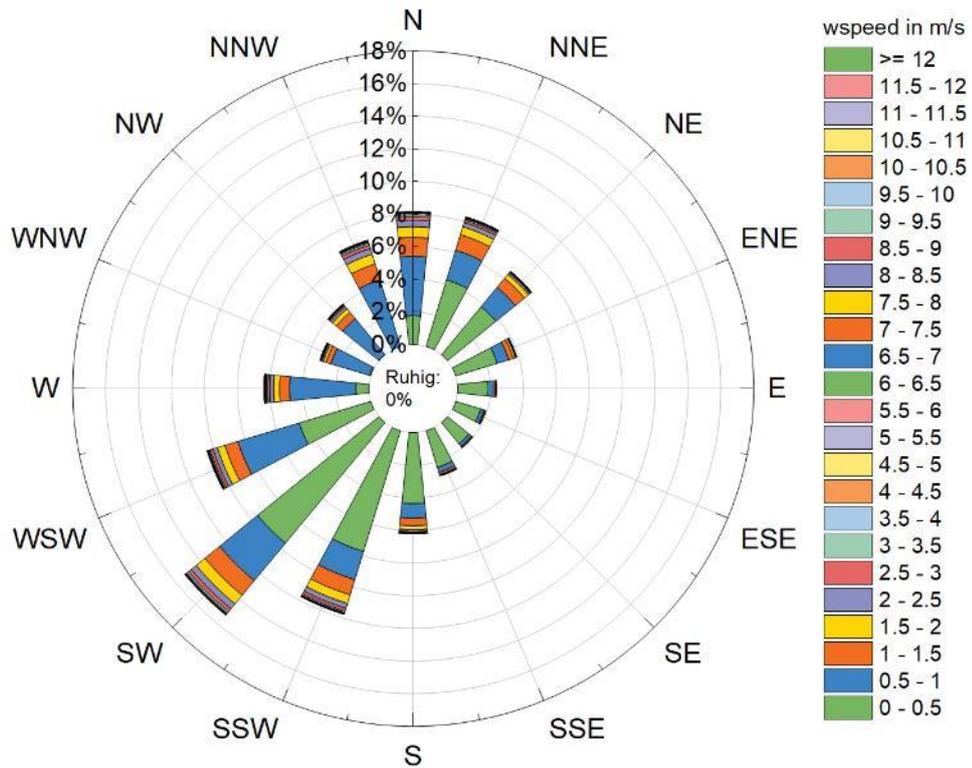


Abbildung 7.2-4: Häufigkeiten der Windrichtung und windrichtungsabhängigen Windgeschwindigkeit an der Klimastation Gründach Botanischer Garten, 12.05.2020 - 10.11.2022.

## 7.2.2. Vergleich der Messdaten der Klimastation mit der Referenzstationen

### Temperatur

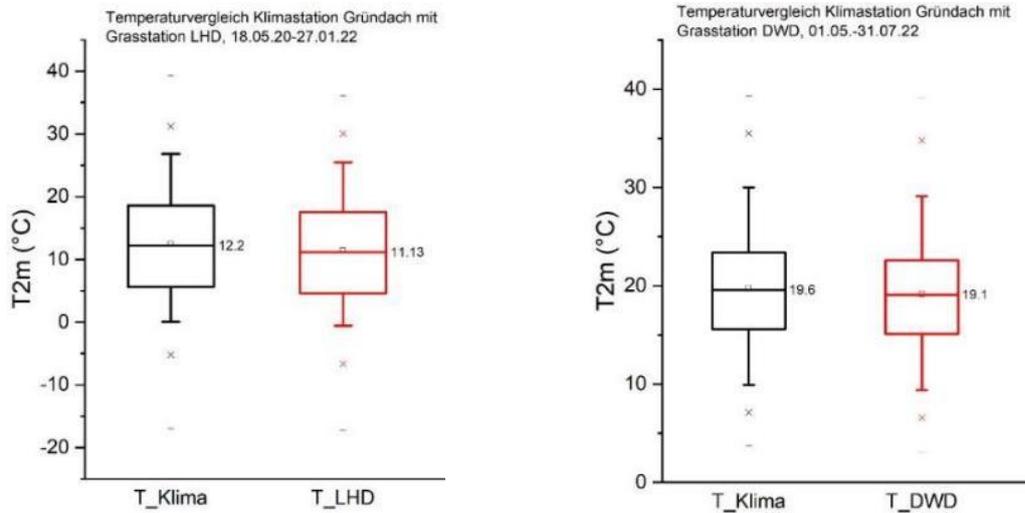


Abbildung 7.2-5: Temperaturvergleich der Klimastation am Gründach mit der Referenzstation LHD (links) bzw. DWD (rechts).

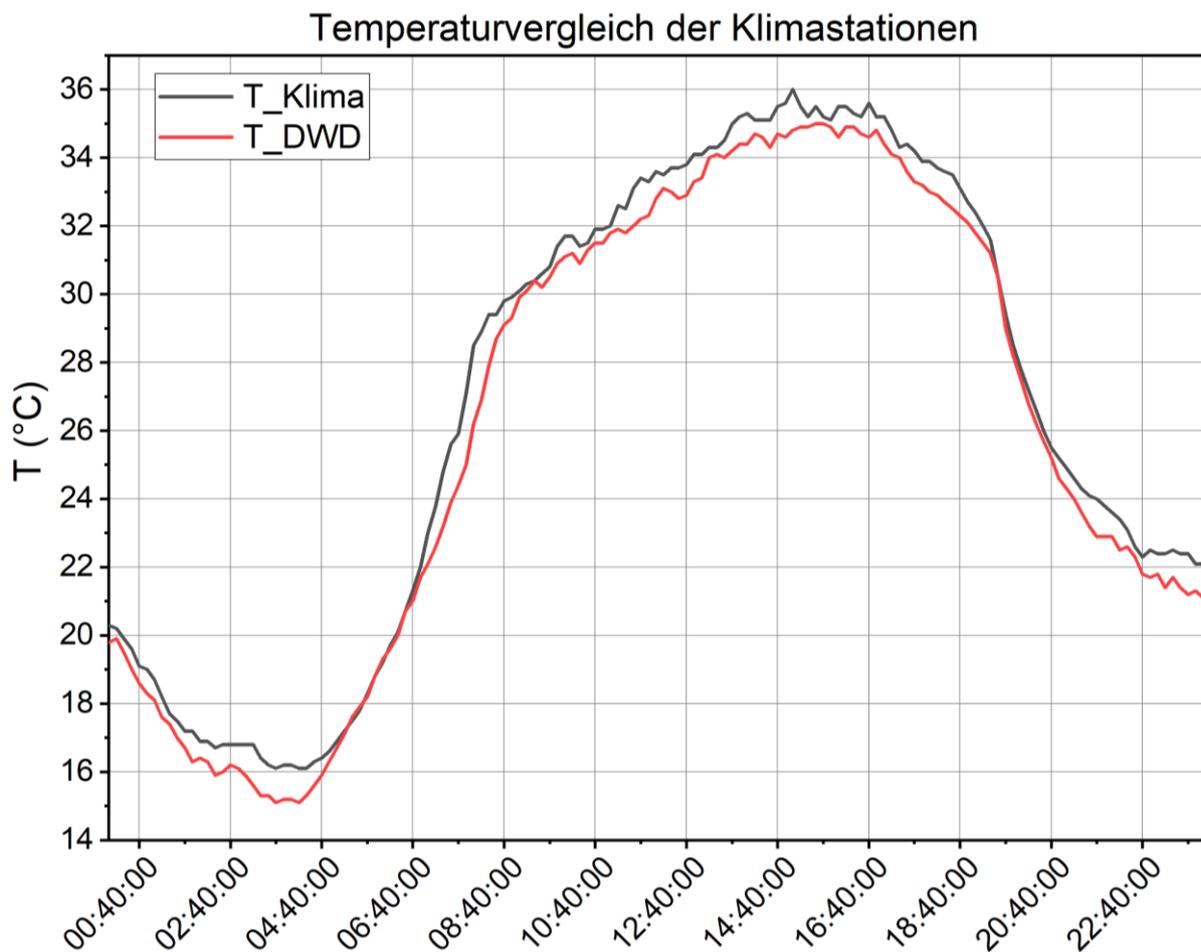


Abbildung 7.2-6: Temperaturvergleich der Klimastation am Gründach mit der DWD-Referenzstation für den 18.06.2022.

Um die Repräsentativität der Messdaten an der Klimastation bewerten zu können, erfolgte ein Datenvergleich mit den Referenzstationen auf der benachbarten Grasfläche. Die Abbildung 7.2-5 zeigt den Vergleich der gemessenen Lufttemperatur der Klimastation am Gründach mit den Referenzstationen. Das Ergebnis deutet auf eine systematische positive Abweichung der Lufttemperatur an der Klimastation hin. Diese beträgt im Mittel für den gesamten Vergleichszeitraum Mai 2020-Januar 2022 ca. 1 K (Vergleich zur LHD-Station) und für den Sommer 2022 (Mai-Juli) ca. 0.5 K. Die Ursache kann sowohl in standortsbedingten als auch sensorbedingten Unterschieden liegen.

Die Klimastation erhält aufgrund der Nähe zu größeren Bäumen und zum Verwaltungsgebäude mehr langwellige Strahlung, was sich v.a. in einer Anhebung der nächtlichen Minima zeigt. Da sich die Bäume v.a. nördlich der Station befinden, wirkt sich dieser Einfluss weniger auf die Globalstrahlung und damit auf Maxima der Temperatur am Tage aus (Abbildung 7.2-6).

### Feuchte

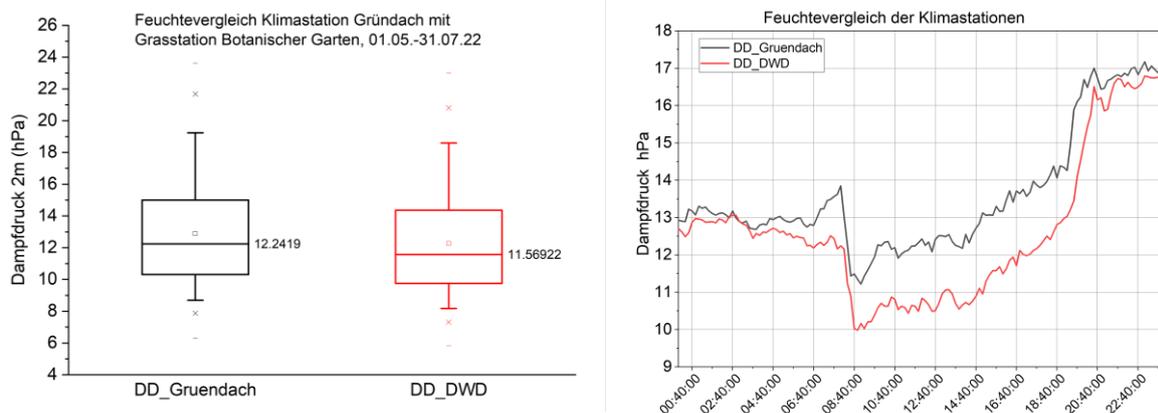


Abbildung 7.2-7: Dampfdruckvergleich der Klimastation am Gründach mit der DWD-Referenzstation für den Zeitraum Mai-Juli 2022 (links) und den 18.06.2022 (rechts).

Die raumzeitliche Verteilung der Feuchte ist gekoppelt mit den lokalen Feuchtequellen, der Temperaturverteilung und der Luftturbulenz. Die Abbildung 7.2-7 (links) illustriert, dass der Dampfdruck an der Klimastation im Mittel um ca. 0,6 hPa höher als an der Referenzstation ist. In der betrachteten sommerlichen Phase transpirieren Pflanzen aktiv Wasser, so dass die Nähe zu den Laubbäumen ein Grund für den höheren Dampfdruck an der Klimastation sein dürfte. Des Weiteren führt die größere Luftruhe und Auskühlung an der Referenzstation zu einem stärkeren nächtlichen Absinken des Dampfdrucks, insbesondere durch Kondensation von Wasserdampf infolge Taubildung (Abbildung 7.2-7, rechts). Tagsüber bei stärkerer Turbulenz sind die Unterschiede geringer und sind v.a. durch die nahen Feuchtequellen an der Klimastation durch Bäume und das Gründach zu erklären. Allgemein lassen sich jedoch die Einflüsse des Gründachs und des Baumbestandes auf die Feuchteerhöhung an der Klimastation schwer voneinander trennen.

Um den direkten Einfluss des Gründachs auf Temperatur und Feuchte in der Umgebung besser zu quantifizieren, bedarf es einer räumlichen Verdichtung der Messungen zwischen Gründach und Klimastation.

### Globalstrahlung

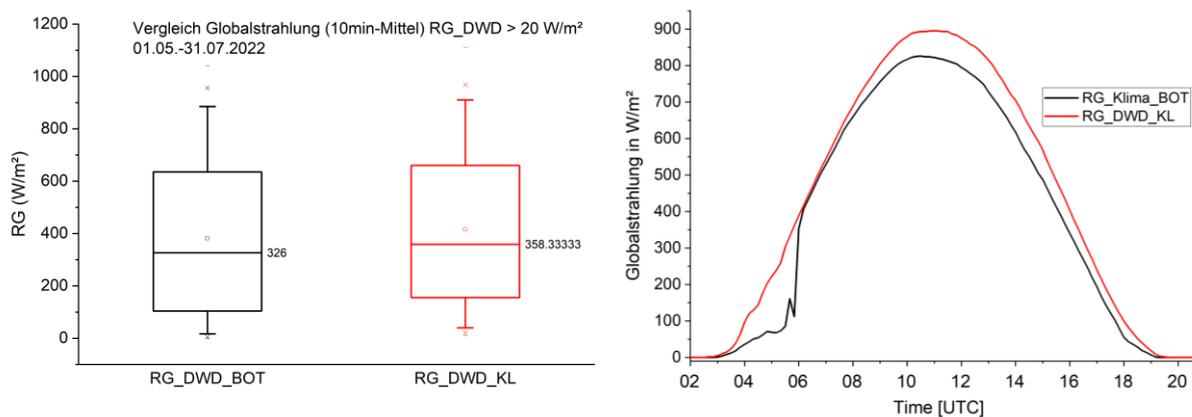


Abbildung 7.2-8: Vergleich der gemessenen Globalstrahlung der Klimastation am Gründach mit der DWD-Referenzstation für den Zeitraum Mai-Juli 2022 (links) und den 18.06.2022 (rechts).

Im Vergleich der gemessenen Globalstrahlung lässt sich gut der Abschirmungseffekt durch die Bäume im Bereich der Klimastation erkennen (Abbildung 7.2-8, rechts). Dies führt zu einer systematischen Verringerung der Einstrahlung im Vergleich zur freistehenden Referenzstation (Abbildung 7.2-8, links). Bei Verdunstungsberechnungen auf dem Gründach muss dieser Unterschied beachtet werden, da bereits der geringe Abstand der Klimastation zum Gründach zu einer Veränderung der Einstrahlungsverhältnisse führt.

### Wind

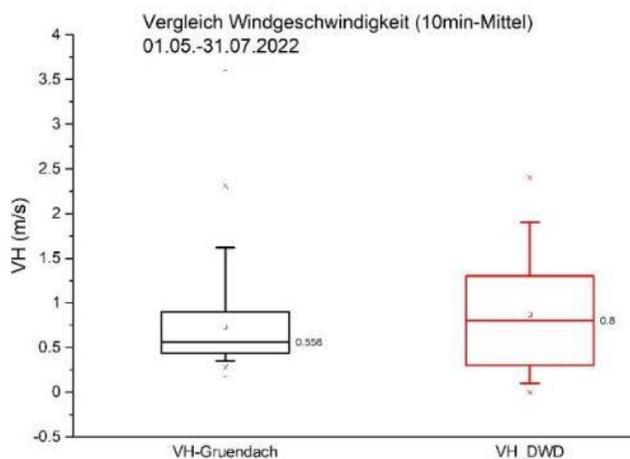


Abbildung 7.2-9: Vergleich der Windgeschwindigkeit an der Klimastation am Gründach mit der DWD-Referenzstation für den Zeitraum Mai-Juli 2022 (links).

Analog zu Globalstrahlung kommt es durch die Umgebung der Klimastation auch zu einer deutlichen Abschwächung des Windfeldes. Sie verringert sich im Mittel über den Zeitraum Mai-Juli 2022 (Abbildung 7.2-9) um ca. 0,25 m/s im Vergleich zur freistehenden DWD-Referenzstation. Gleichzeitig führt der Einfluss der hohen Hindernisse (Bäume, Gebäude) im Umfeld zu einer deutlichen Abschirmung in der Hauptanströmrichtung im Vergleich zur Referenzstation (Abbildung 7.2-10).

## Wind

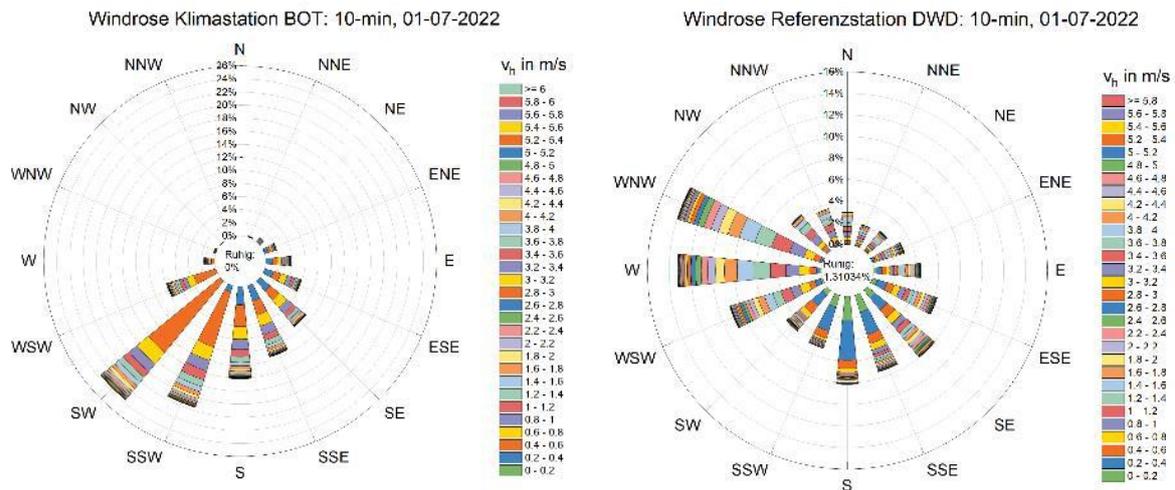


Abbildung 7.2-10: Windrichtungs- und Geschwindigkeitsverteilung an der Klimastation am Gründach und der DWD-Referenzstation für den Zeitraum Januar-Juli 2022.

### 7.2.3. Bewässerung, Pflanzenbewuchs und Oberflächentemperatur

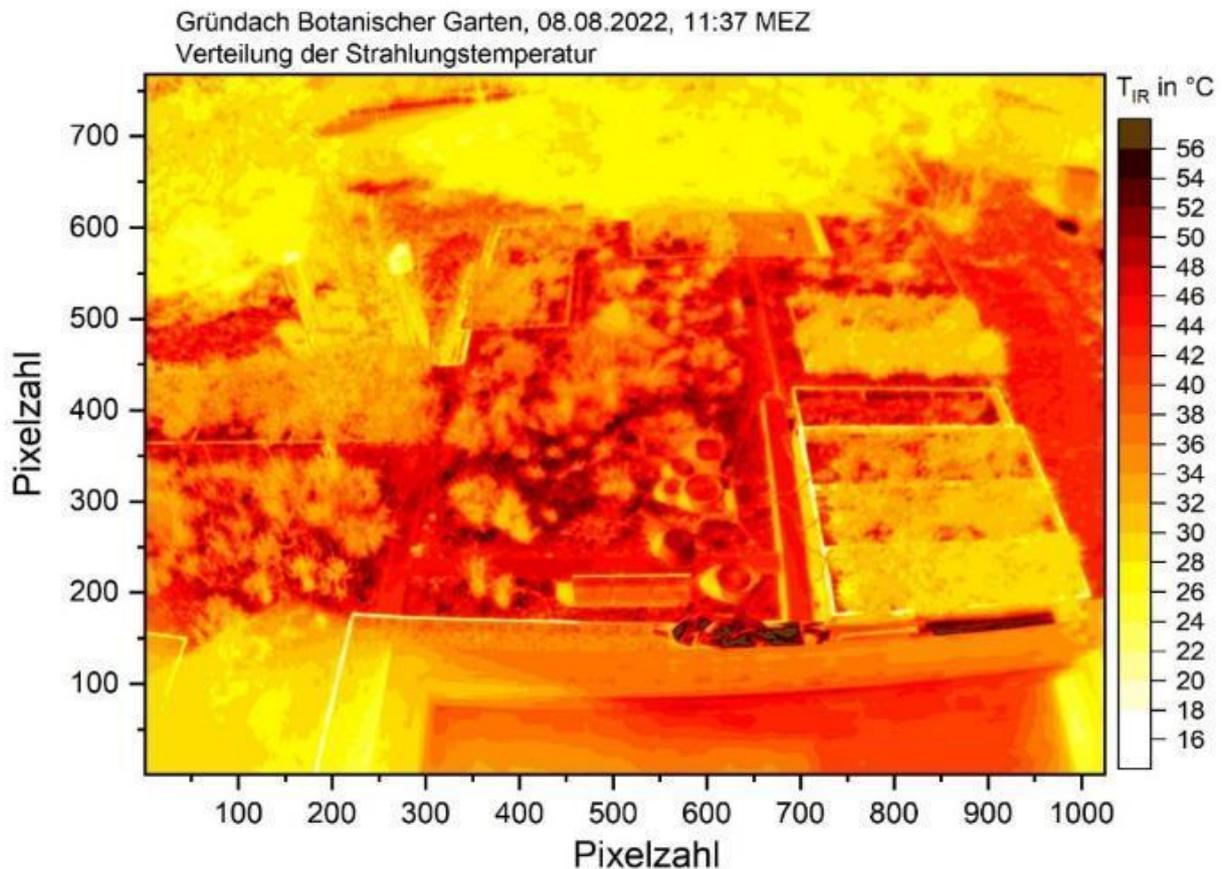


Abbildung 7.2-11: Strahlungstemperatur des Gründachs im Sichtfenster des Infrarotsensors, 08.08.2022, 11:37 MEZ.

#### Analyse der Daten des Thermalsensors

Eine wesentliche Grundlage zur Darstellung des unterschiedlichen thermischen Verhaltens des Gründaches sind die Thermalaufnahmen des Infrarotsensors von einer fest installierten Position an der Fassade des Verwaltungsgebäudes (vgl. Abbildung 7.1-3). In Abbildung 7.2-11 ist die Thermalaufnahme an einem sonnigen Tag zu Mittagszeit (08.08.2022, 11:37 MEZ) dargestellt. Die hohe Anzahl an Bildpunkten (1024x768) gestattet die detaillierte Analyse des Einflusses der Bewässerung auf den Pflanzenbewuchs und damit auf die Oberflächentemperatur des Gründachs. Gut erkennbar sind die kühleren Bereiche der gut wasserversorgten Bepflanzung in den Feldern FI.1 und FI.5 im Vergleich zum unbewässerten Feld FI.4 (Sedumbepflanzung) bzw. außerhalb der Grauwasserbewässerung. Hier treten im Extremfall Unterschiede von mehr als 30 K in der Oberflächentemperatur zwischen bewässerten (und damit dicht begrünt) und unbewässerten Bereichen auf. Sehr niedrige und sehr hohe und damit unrealistische Messwerte treten an den verspiegelten Metallflächen der technischen Anlagen auf. Diese Werte wurden bei der speziellen Analyse der Flächen FI.1 bis FI.6 ausgeschlossen. Ebenso

wurden die Messdaten des Eingangsbereichs des Verwaltungsgebäudes (unterer Bildteil) bei der Analyse ausgelassen.

### Einfluss der Bewölkung

Die Ausprägung der Temperaturunterschiede auf dem Gründach hängt stark von der solaren Einstrahlung ab. Bei bewölkten Verhältnissen werden die thermischen Unterschiede stark gedämpft. Die Abbildung 7.2-12 zeigt den Zusammenhang von Oberflächentemperatur (Maximum, Minimum und Mittel in der Fläche FI.3) mit der Globalstrahlung für den Juni 2022, jeweils 11:00 MEZ. An bedeckten Tagen (z.B. 09.06.2022) treten nur sehr geringe Unterschiede auf, während an sonnigen Tagen (z.B. 19.06.2022) die Differenz zwischen maximaler und minimaler Oberflächentemperatur in FI.3 über 10 K beträgt.

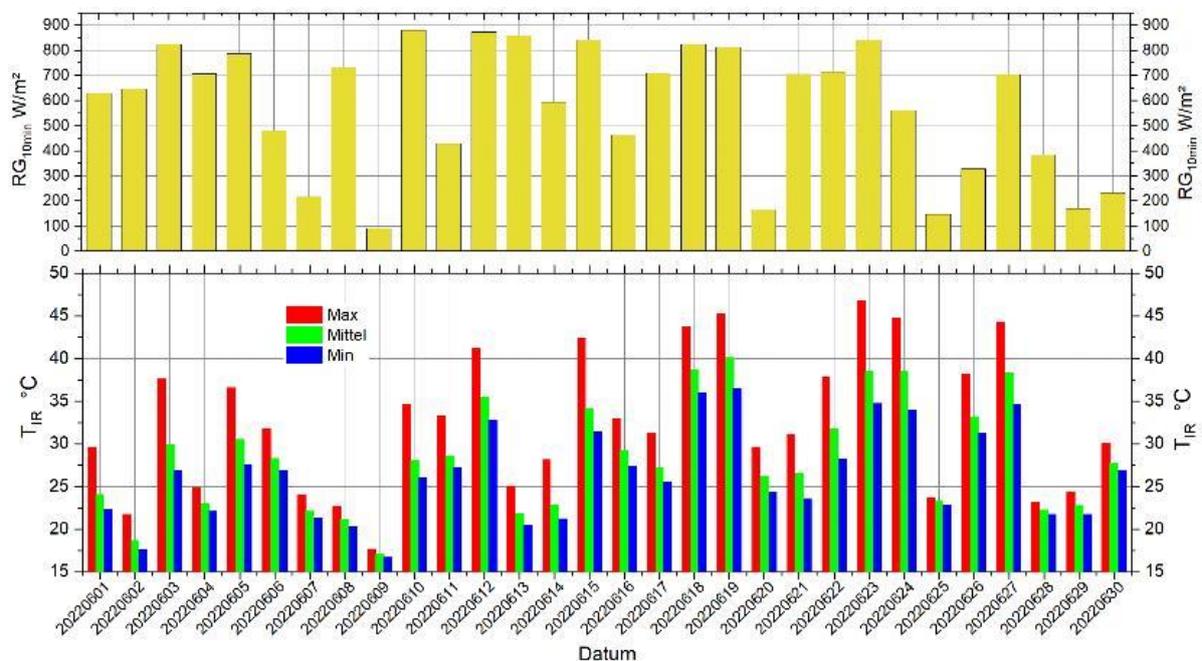


Abbildung 7.2-12: Zusammenhang von Solarstrahlung und Oberflächentemperatur im Juni 2022, 11:00 MEZ, FI.3.

### Einfluss der Witterung auf die Oberflächentemperatur

Die Abbildung 7-18 verdeutlicht diesen Einfluss der Witterung auf den Pflanzenwuchs und damit auf die Oberflächentemperatur an zwei Augusttagen mit ähnlichen Strahlungsbedingungen in den Jahren 2021 und 2022. Die unbewässerte Pflanzfläche im zentralen Bereich des Gründachs zeigt eine deutliche geringere Temperatur im regenreichen Jahr 2021 im Vergleich zum Dürrejahr 2022.

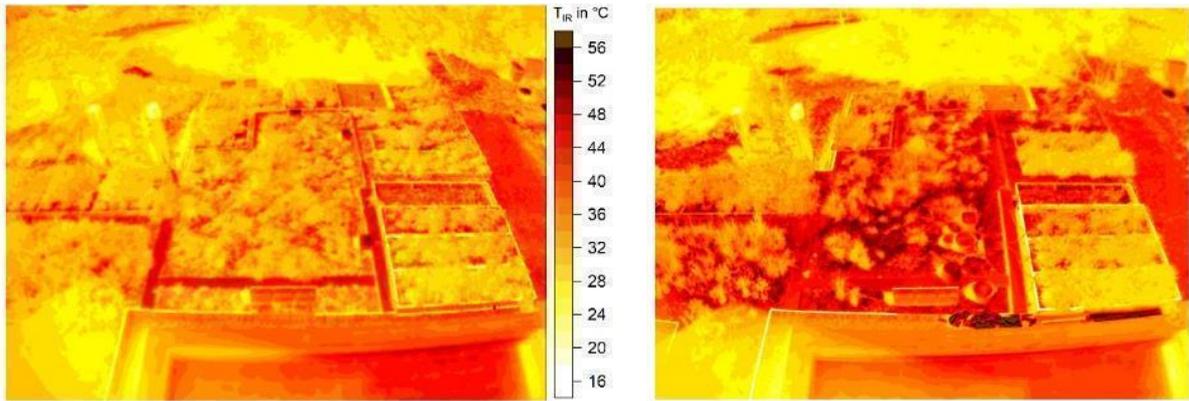


Abbildung 7.2-13: Vergleich der Oberflächentemperatur für zwei wolkenlose Tage im August. Links: 14.08.2021, 11:35 MEZ, rechts: 08.08.2022, 11:37 MEZ.

### Einfluss des Gebäudeschattens

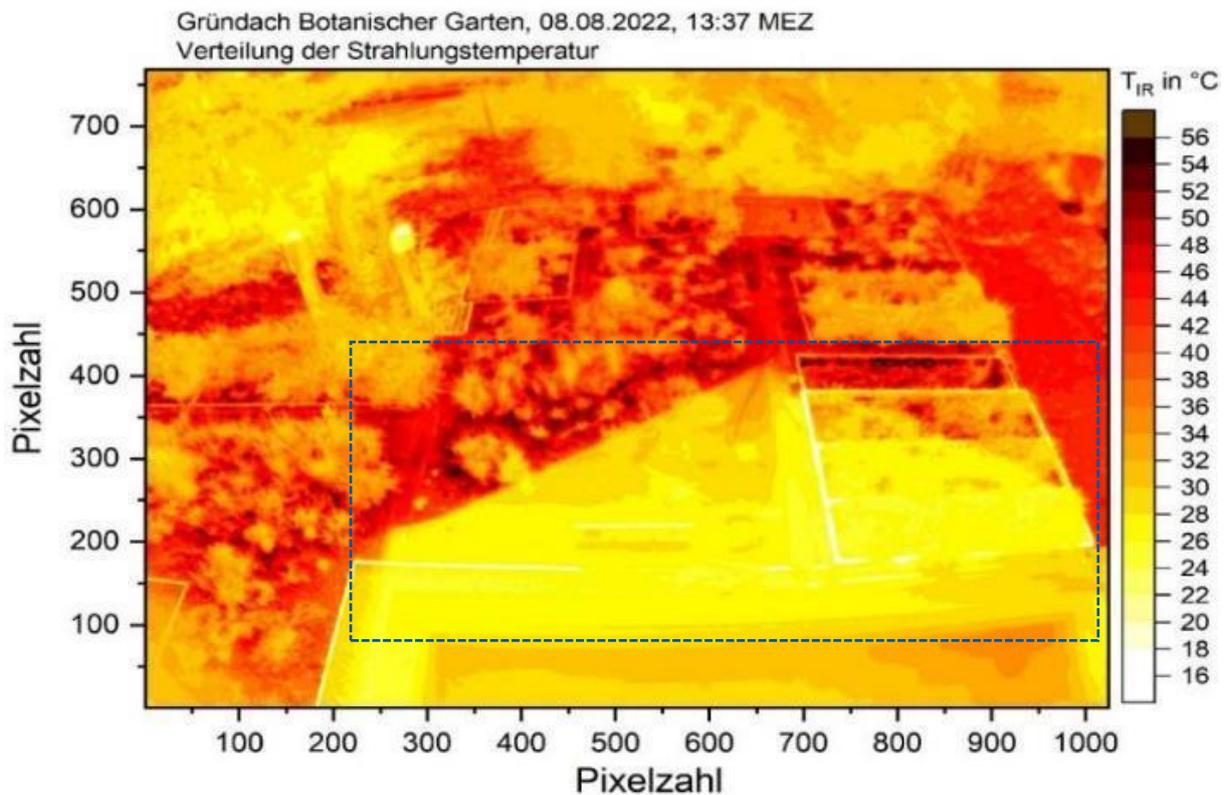


Abbildung 7.2-14: Strahlungstemperatur des Gründachs im Aufnahmebereich des Infrarotsensors bei Durchgang des Gebäudeschattens am 08.08.2022, 13:37 MEZ.

Der Schatteneinfluss auf die Oberflächentemperatur des Gründachs wird neben der Bewölkung auch durch das Verwaltungsgebäude verursacht. Die Abbildung 7.2-14 zeigt die Thermalaufnahme bei Durchgang des Gebäudeschattens an einem wolkenlosen Tag auf dem Gründach (die Aufnahme erfolgte 2 Stunden nach der Aufnahme in Abbildung 7.2-13). Deutlich erkennbar ist die starke Dämpfung der Oberflächentemperatur im Schattenbereich.

Diese „Störung“ des Strahlungseinflusses auf den Forschungsfeldern des Gründachs muss bei Langzeitauswertungen beachtet werden, da sie zu einer „Verschmierung“ der Information führt. Der Schatteneinfluss zeigt sich sowohl im Tagesgang des lokalen Maximums (Abbildung 7.2-15) als auch in der Häufigkeitsverteilung der Strahlungstemperatur (Abbildung 7.2-16) für den interessierenden Bereich (Fl.1 bis Fl.6 bzw. Rahmen in Abbildung 7.2-14). Für den ausgewerteten Tag 08.08.2022 führte der Schattendurchgang zu einer deutlichen Absenkung der Oberflächentemperatur von im Mittel ca. 7 K (Abbildung 7.2-16).

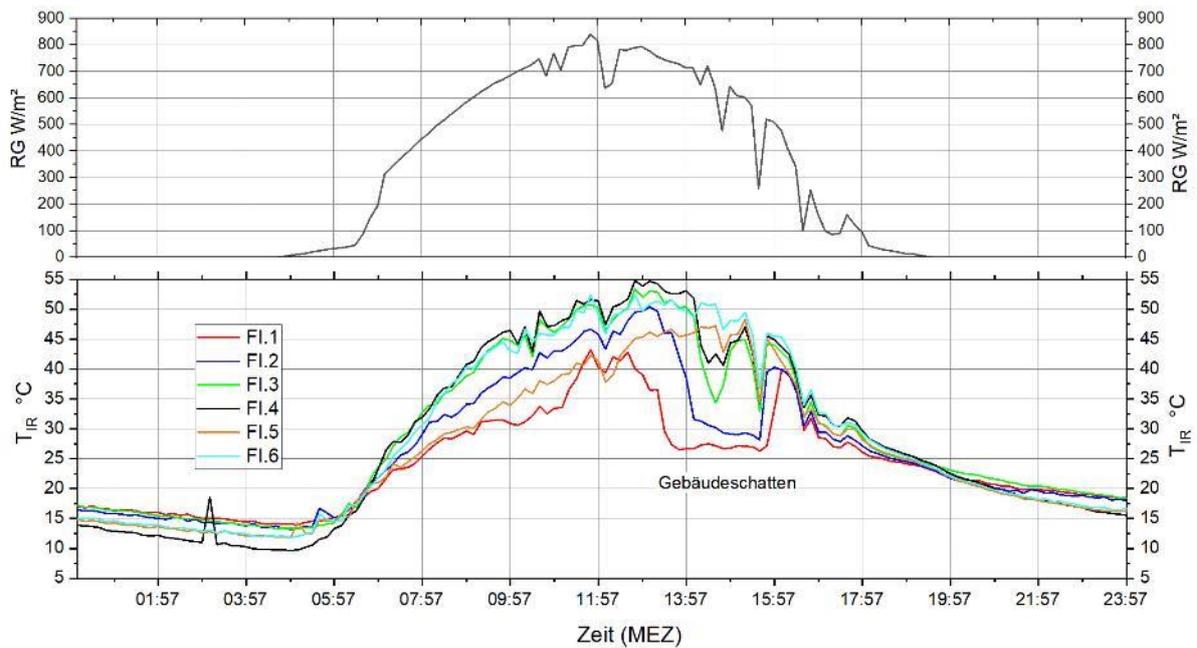


Abbildung 7.2-15: Tagesgang der Globalstrahlung und der lokalen maximalen Strahlungstemperatur am 08.08.2022 in den Flächen Fl.1 bis Fl.6. Der Einfluss des Gebäudeschattens ist bis Fl.4 erkennbar.

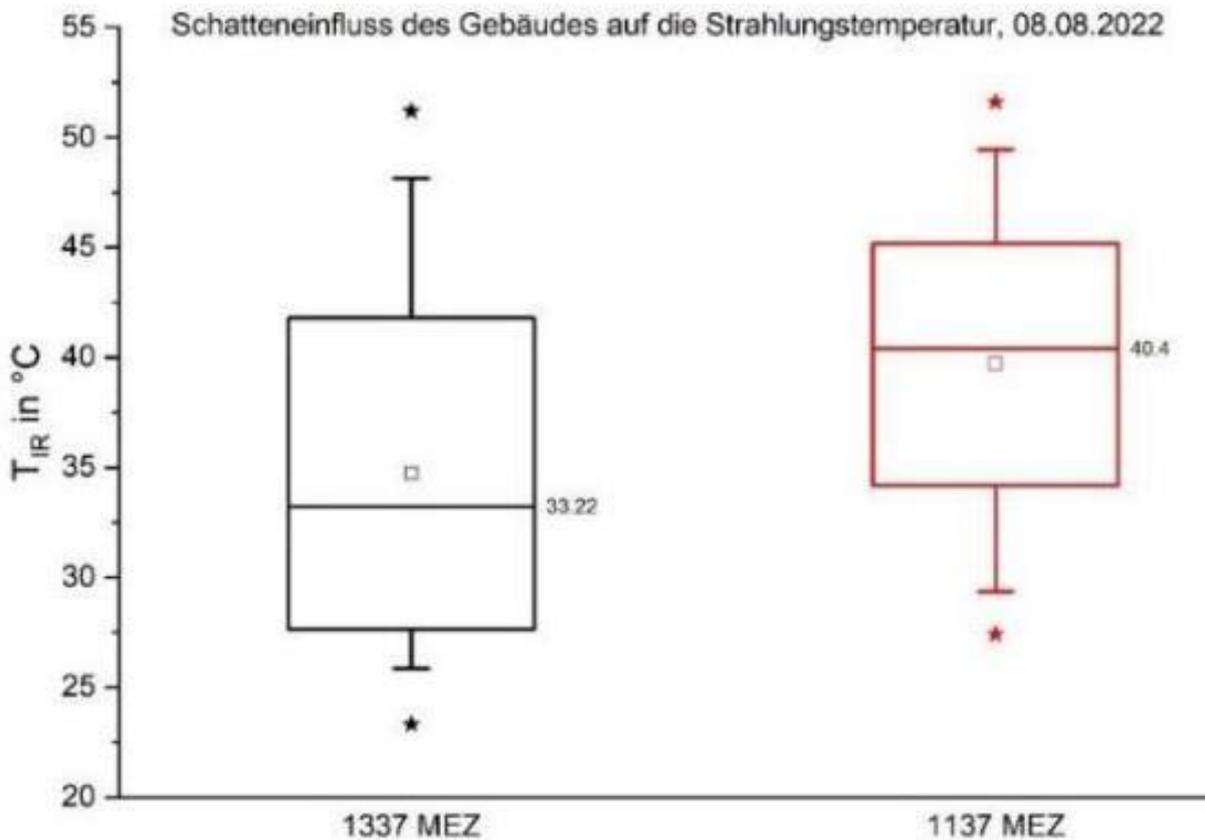


Abbildung 7.2-16: Einfluss des Schattendurchganges (Boxplot links) des Verwaltungsgebäudes auf die Oberflächentemperatur im Vergleich zu voller Besonnung (Boxplot rechts) im mittleren Bereich des Gründachs.

### Einfluss von Bewässerung und Bewuchs

Um den Schatteneinfluss auszuschließen, wurde die Wirkung von Bewässerungssteuerung und Pflanzenwuchs auf die Oberflächentemperatur in den Lysimeterfeldern Fl.1 bis Fl.3 für die schattenfreien Stunden am Vormittag analysiert.

Die Abbildung 7.2-17 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Strahlungstemperatur für die Zeit 10:00-12:45 MEZ an einem wolkenlosen Sommertag (18.06.2022). Es zeigt sich deutlich, dass die Häufigkeit hoher Maxima mit abnehmender Vegetationsdichte von Feld Fl.1 zu Fl.3 stark zunimmt. Diese Unterschiede zwischen den Flächen mit unterschiedlichem Bewässerungsregime verschärfen sich im Laufe des Dürresommers 2022 und sind im August am stärksten (Abbildung 7.2-18).

Für die Sommermonate 2022 lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Pflanzenbedeckungsgrad bzw. Grünvolumen zur Änderung der lokalen Mitteltemperatur in den bewässerten Feldern ableiten (Abbildung 7.2-19).

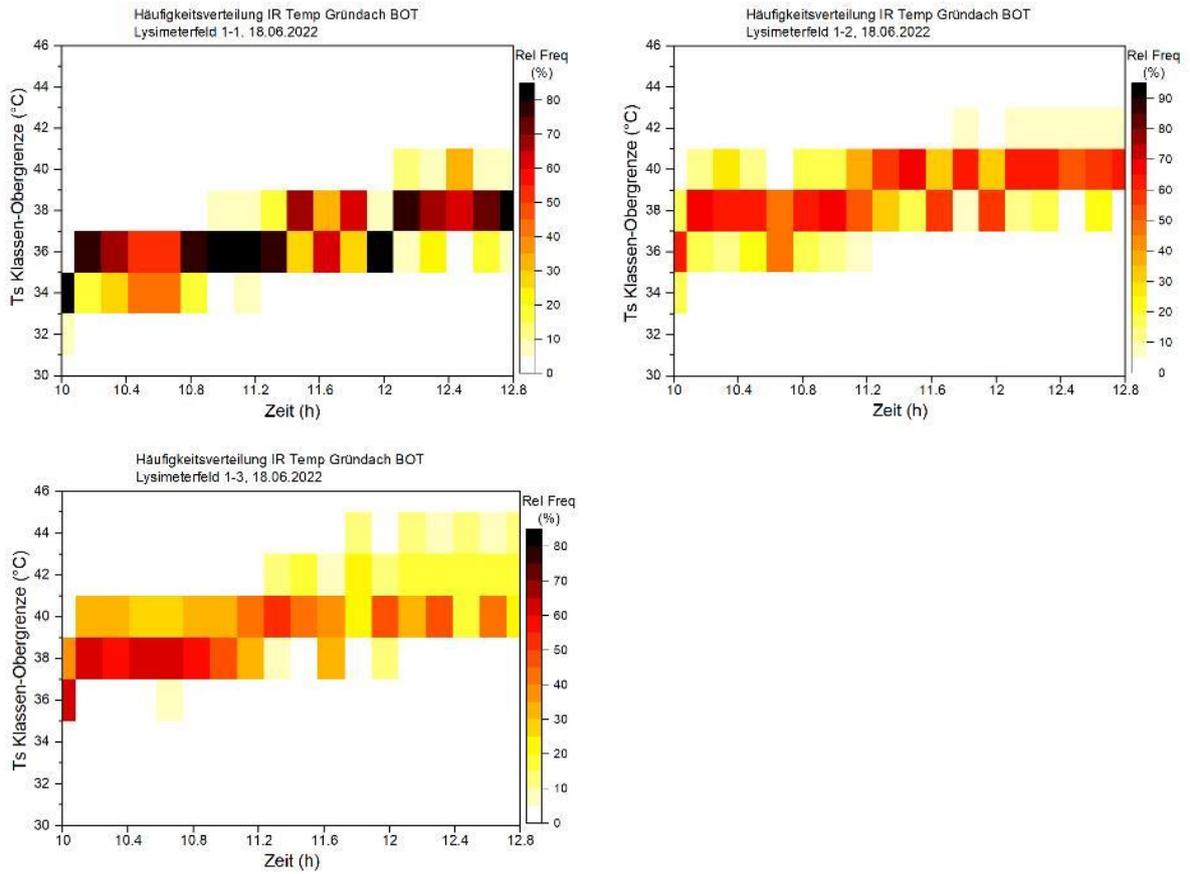


Abbildung 7.2-17: Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperatur am 18.06.2022, 10:00-12:50 MEZ in den Feldern FI.1 bis FI.3.

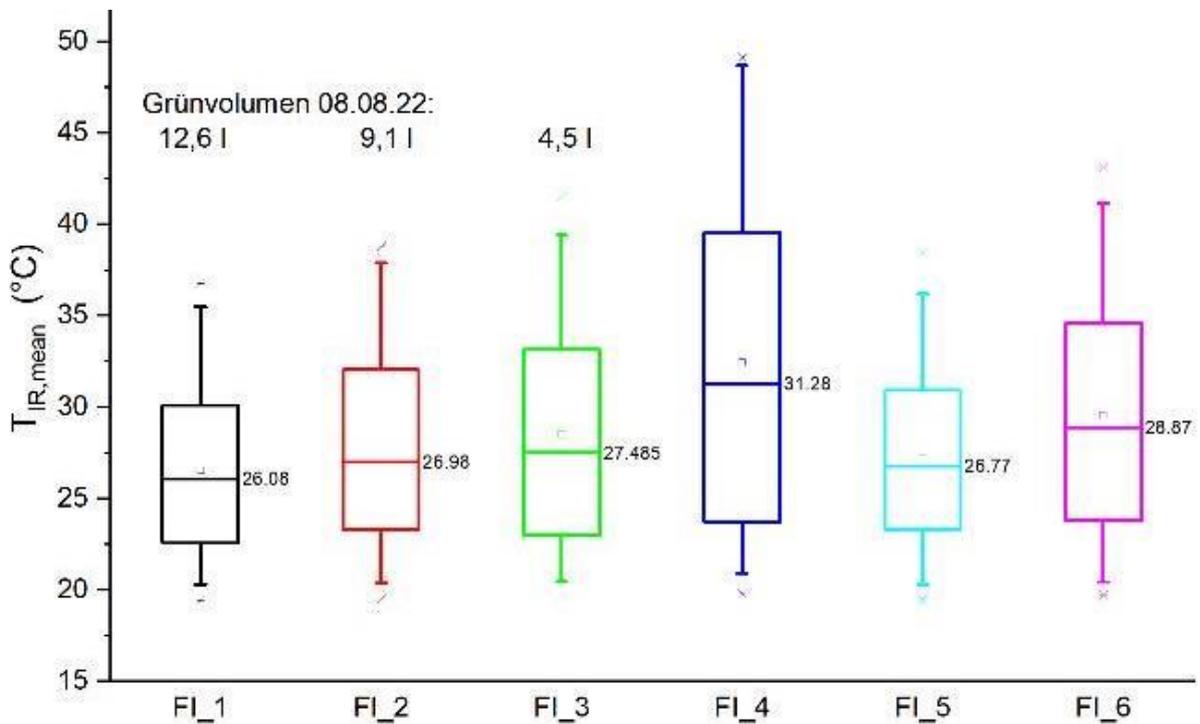


Abbildung 7.2-18: Verteilung der Flächenmitteltemperatur in den Feldern FI.1 bis FI.6 im August 2022, ca. 11:00 MEZ.

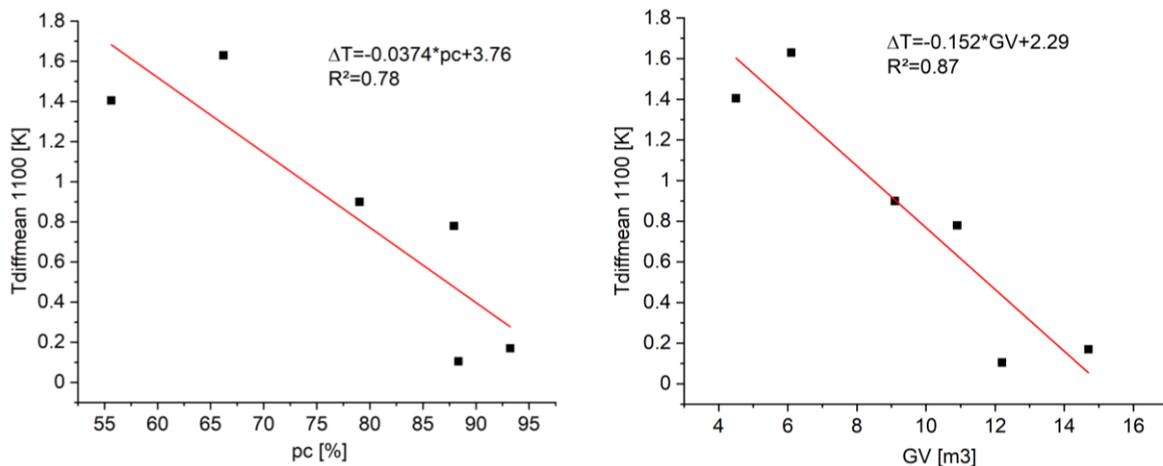


Abbildung 7.2-19: Änderung der mittleren Oberflächentemperatur in den Lysimeterfeldern Fl.2 und Fl.3 im Vergleich zum Feld Fl.1 in Abhängigkeit von Pflanzenbedeckungsgrad (pc) bzw. Grünvolumen (GV). Basis: Messdaten TIR 11:00 MEZ, pc und GV von Anfang August, Mitte Juni und Ende September 2022.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurden im Frühjahr 2021 mobile Messungen am Gründach zur Bestimmung von kurzweiliger Strahlungsreflektivität (Albedo) und langweiliger Strahlungsemissivität in Abhängigkeit von der Entwicklung der Bepflanzung und vom Bewässerungsregime durchgeführt (BSc Arbeit Noack, Kapitel 3.2.2).

Dabei wurde insgesamt nur eine geringe Abhängigkeit der Albedo von der räumlichen Variabilität des Bewuchses festgestellt (Tabelle 7-2). Die Emissivität (die Menge abgestrahlter Energie im Verhältnis zur maximal möglichen Abstrahlung bei einer bestimmten Temperatur) nimmt mit dem Beginn der Vegetationsperiode im Frühjahr zu und erreicht Mitte Mai den Maximalwert (>0,95, Tabelle 7-3).

Tabelle 7-2: Messung der Oberflächenalbedo auf dem Gründach am 18.05.2021, vormittags.

| Albedo       |                  |            |                    |
|--------------|------------------|------------|--------------------|
| Oberfläche   | Anzahl Messungen | Mittelwert | Standardabweichung |
| bewässert    | 13               | 0,12       | 0,01               |
| unbewässert  | 10               | 0,14       | 0,02               |
| Klimastation | 19               | 0,16       | 0,01               |

Tabelle 7-3: Messung der Oberflächenemissivität auf dem Gründach im Frühjahr 2021, vormittags.

| Emissivität |           |             |              |
|-------------|-----------|-------------|--------------|
| Datum       | bewässert | unbewässert | Klimastation |
| 30.03.      | 0,83      | 0,81        | 0,83         |
| 31.03.      | 0,81      | 0,82        | 0,73         |
| 28.04.      | 0,8       | 0,82        | 0,82         |
| 10.05.      | 0,9       | 0,94        | 0,99         |
| 11.05.      | 0,94      | 0,99        | 0,99         |

Dies ist ein Hinweis auf das höher Abstrahlungs- und damit Abkühlungspotential von begrünten Oberflächen im Vergleich zur unbewachsenen Oberfläche. Allerdings muss beachtet werden, dass die Bepflanzung im Jahr 2021 noch nicht voll entwickelt war.

### 7.3. Mobile Klimamessungen und Modellsimulationen

Eine weitere studentische Projektarbeit befasst sich mit dem Mikroklima des Botanischen Gartens. Dabei wurden Ende März 2021 mobile Rucksackmessungen durchgeführt, bei denen das Umfeld des Gründachs eingebunden wurden.

Die Ergebnisse in Abbildung 7.3-1 und Abbildung 7.3-2 zeigen den Einfluss der spezifischen Oberfläche und der Beschattung auf die Verteilung der Luft- und Oberflächentemperatur. Sie stellen damit einen guten Vergleich zur gemessenen Variabilität der Oberflächentemperatur auf dem Gründach (s. Ergebnisse in 7.1) in einer größeren räumlichen Skala dar.

Zusätzlich wurden in einer Masterarbeit (P. Volks, s. 3.2.2) Simulationen mit dem Mikroklimamodell ENVI-met (Sinsel, 2021) für ausgewählte Strahlungstage durchgeführt, um die Anwendbarkeit des Modells zur Untersuchung der Mikroklimawirkung des Gründachs bei unterschiedlicher Bepflanzung zu prüfen.



Abbildung 7.3-1: Trendkorrigierte Lufttemperatur während einer Messrunde im Botanischen Garten am 30.03.21, 13:46-14:15 MESZ (Daten aus Projektarbeit P. Volks (s. 3.2.2)): × Lage des Gründachs.



Abbildung 7.3-2: Oberflächentemperatur während einer Messrunde im Botanischen Garten am 30.03.21, 13:46-14:15 MESZ (Daten aus Projektarbeit P. Volks (s. 3.2.2): × Lage des Gründachs.

Das beispielhafte Ergebnis in Abbildung 7.3-4 zeigt eine Envi-met Simulation für den (wolkenfreien) 23.04.2021. Gut erkennbar ist die unterschiedliche Dauer des Schattenwurfs des Verwaltungsgebäudes und dessen Wirkung auf die direkte Solarstrahlung sowie die mittlere Strahlungstemperatur. Durch den Vergleich mit Messwerten der Strahlung an der Klimastation soll das Modell in weiteren Studien kalibriert und als Grundlage für eine detaillierte Betrachtung der Energiebilanz des Gründachs angewendet werden.

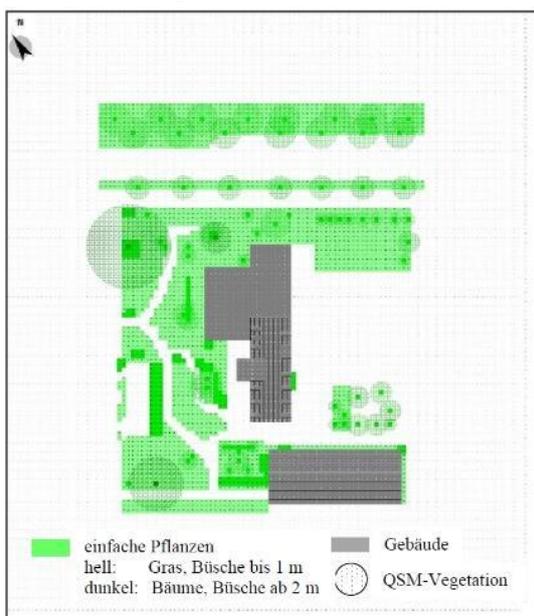


Abbildung 7.3-3: Verwaltungsgebäude im Botanischen Garten mit Gründach und umgebender Vegetation: Inputfile des Mikroklimamodells Envi-met5.

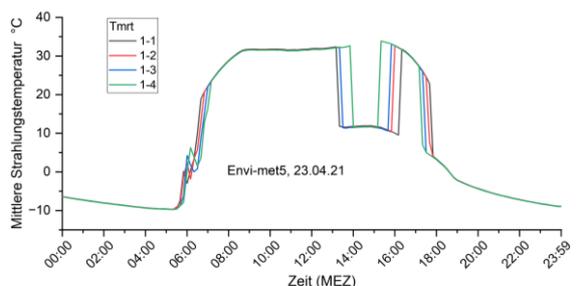
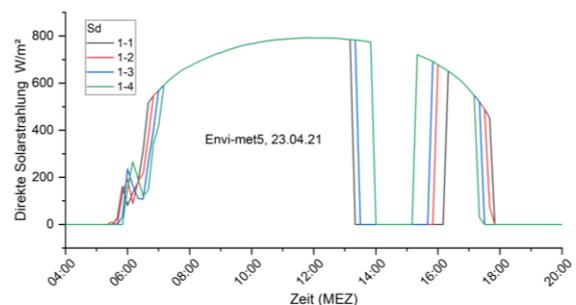


Abbildung 7.3-4: Tagesgang der direkten solaren Einstrahlung und der mittleren Strahlungstemperatur (entspricht der Summe aller Strahlungsströme) auf den Feldern FI-1 bis FI-4.

## 8. Querschnittsorientierte Diskussion der Ergebnisse und Fazit

### 8.1. Diskussion

In der Querschnittsbetrachtung ist festzustellen, dass die Bewässerung positive Auswirkungen auf die Vegetationsentwicklung, die Verdunstungsleistung und Kühlungswirkung von Dachbegrünungen hat. Dem gegenüber stehen eine verringerte Retentionsleistung und ein erhöhter Stoffaustrag in Folge erhöhter Abflüsse bei Regenereignissen. Eine optimierte Bewässerung sollte entsprechend diese Systemleistungen gegeneinander abwägen und priorisieren.

Im Folgenden werden besonders auffällige Kongruenzen bzw. Divergenzen der Ergebnisse der fachspezifischen Arbeitspakete dargestellt.

#### Vitalität und Ästhetik, Vegetationsentwicklung und Oberflächentemperatur

Das sehr feuchte und milde Jahr 2021 führte in Bezug auf die Vitalität und Ästhetik der Vegetation zu einer sehr ähnlichen Entwicklung der verschiedenen bewässerten Forschungsfelder, da die Pflanzen zusätzlich zur regelmäßigen Bewässerung ausreichend mit Niederschlagswasser versorgt wurden. Im Gegensatz dazu verursachte die anhaltende Trockenheit 2022 ausgeprägte Unterschiede in der Vitalität und Ästhetik der Vegetation.

Die Auswertungen der Oberflächentemperatur für Sommertage im Trockenjahr 2022 haben gezeigt, dass unbewässerte und gering bewässerte Gründächer deutlich geringere Abkühlung bewirken als medial und maximal bewässerte. Die Unterschiede in der Abkühlung der beiden letztgenannten ist dagegen gering. Auch die Vegetation zeigt trotz Verdopplung der Bewässerungsmenge in Gesamteindruck und Deckungsgrad keine signifikante verbesserte Entwicklung. Aus Gründen der Ressourcenschonung ist daher bei den untersuchten Rahmenbedingungen das mediale Regime zu favorisieren.

Die Differenz der Oberflächentemperaturen zwischen den einzelnen Regimen lässt sich gut in einem linearen Zusammenhang zum Pflanzenvolumen setzen. Das überschlägig aus den erhobenen Parametern Wuchshöhe und Deckungsgrad ermittelte Pflanzenvolumen nimmt im Verlauf des Sommers für alle drei Bewässerungsregime zu, zeitgleich nehmen die Temperaturunterschiede zwischen den Regimen ab. Die Kühlwirkung in Folge Bewässerung ist also bei geringer Pflanzendeckung stärker ausgeprägt.

Die Simulation der Wasserbilanz für die Jahre 2007 bis 2022 macht deutlich, dass regelmäßig bereits im Frühjahr Trockenperioden auftreten können. Falls diese kritisch für das Pflanzenwachstum sind, sollte der Beginn der Bewässerung an den jeweiligen Witterungsverlauf angepasst werden. Im Rahmen unserer bisherigen Untersuchungen

erschien ein Bewässerungsbeginn im Mai jedoch ausreichend, um eine vitale Pflanzenentwicklung für die vorhandene Pflanzensammensetzung zu gewährleisten.

#### Verdunstungsleistung, Wärmespeicherfähigkeit und Kühlwirkung

Sowohl in der Wasserbilanz für die Lysimeterfelder, als auch bei der Abschätzung der Verdunstungskennwerte aus den Temperaturmessungen, ist ein annähernd proportionaler Anstieg der Verdunstungsleistung mit steigender Bewässerungsmenge feststellbar. Diese Ergebnisse werden auch durch die Wasserbilanzsimulation bestätigt, die einen weitgehenden Transfer der Bewässerungsmengen in Verdunstung abbilden.

Die bauklimatischen Untersuchungen zeigen, dass sich durch eine Bewässerung einer einfachen intensiven Dachbegrünung im Vergleich zu einer nicht bewässerten extensiven Dachbegrünung eine erhebliche Kühlwirkung erzielen lassen. Der Hauptanteil der Kühlwirkung ist auf die deutlich erhöhte Wärmespeicherfähigkeit der bewässerten Felder zurückzuführen, die mit der medialen Bewässerung schon fast die maximale Wirkung zeigt. Die Maximalbewässerung bewirkt im Vergleich dazu nur noch eine marginale Steigerung.

Der Kühleffekt aus der Verdunstung von den Blattoberflächen steht einem strahlungseintrags- und abstrahlungsvermindernden Effekt der Vegetationsbedeckung gegenüber und ist betragsmäßig weit unter dem Effekt der Speicherfähigkeit angeordnet. Dennoch ist die vitale Vegetation auch für die Erhaltung des gespeicherten Wassers im Substrat zuträglich, weil sie die direkte Verdunstung aus dem Substrat reduziert.

#### Bewässerung, Wasserrückhaltevermögen und Wasserhaushalt

Die Simulation der Wasserbilanz zeigt, dass ohne Bewässerung regelmäßig längere Trockenperioden auftreten, die zu Trockenstress der Pflanzen führen. Ohne Bewässerung tritt dieser Zustand an 37% des Simulationszeitraums auf und der mittlere Wassergehalt beträgt 57% der nutzbaren Feldkapazität. Bereits mit der minimalen Bewässerung reduzierte sich der Trockenstress auf 27% der Tage und der Wassergehalt stieg auf 65% nFK. Durch intensivere Bewässerung sind nur noch 15% (mediale Bewässerung) bzw. 6% (maximale Bewässerung) von Trockenstress betroffen und der mittlere Wassergehalt liegt bei 71% nFK (mediale Bewässerung) bzw. 77% nFK (maximale Bewässerung).

Für die Jahre 2021 und 2022 konnte festgestellt werden, dass die einfache Intensivbegrünung bei regelmäßiger, zeitgesteuerter Bewässerung in Trockenperioden kaum Abfluss erzeugte. Dabei wirken sich häufige, geringe Bewässerungsgaben mit weniger als 5 mm Bewässerungsmenge vorteilhaft auf den Rückhalt des Wassers aus. Die Tröpfchenbewässerung mit vorbehandeltem Grauwasser hat sich bewährt und es entstanden keine Betriebsprobleme bei der Verteilung des Wassers auf den Messfeldern. In Folge der Bewässerung wiesen die entsprechenden Felder im Mittel höhere Wassergehalte im Substrat auf. Entsprechend stand ein geringerer Anteil des Porenraums für die Wasserspeicherung bei Regenereignissen zur Verfügung. Bei den 19

ausgewerteten Starkregenereignisse im Untersuchungszeitraum traten mit größeren Bewässerungsmengen auch deutlich höhere Spitzenabflüsse und Abflussvolumen auf. Der Zielkonflikt zwischen besserer Wasserverfügbarkeit für die Vegetation und geringerem Rückhaltevermögen in Folge der Bewässerung, sollte bei Pflanzenauswahl und Bewässerungsoptimierung berücksichtigt werden.

#### Grauwasserverfügbarkeit und Speichervolumen

Das Grauwasser war für den Untersuchungszeitraum immer ausreichend um die Bewässerung der Versuchsflächen zu ermöglichen. Lediglich in Folge von technischen Problemen (undichte Ventile im Verteilsystem und defekte Schaltmechanismen der Pumpe) kam es zu größeren Wasserverlusten, die die Versorgungssicherheit einschränkten. Für den technischen Betrieb solcher Aufbereitungs- und Bewässerungsanlagen sollten entsprechende Einrichtungen zur Überwachung und Alarmierung vorhanden sein.

Mit durchschnittlich 85 Litern Grauwasseranfall pro Tag und einer Speichergröße von 3,5 m<sup>3</sup> bei 63 m<sup>2</sup> bewässerter Dachbegrünung, lag die Versuchsanlage innerhalb der Spannweite von Kenngrößen, für die die Dimensionierung der Wasserspeicherung untersucht wurde. Dabei zeigte sich, dass Speichergrößen von 50 l/m<sup>2</sup> Bewässerungsfläche bzw. je nach Bewässerungsregime im Jahresmittel tägliche Grauwassermengen von 0,6 - 1,2 l/m<sup>2</sup> ausreichend für eine hohe Versorgungssicherheit sind.

Da die vorgeschaltete Pflanzenkläranlage durch Verdunstung in den Sommermonaten teilweise die anfallende Grauwassermenge teilweise um bis zu 50 % vermindert, ist die für die gezielte Bewässerung verfügbare Wassermenge phasenweise eingeschränkt. Um bei begrenzten Wassermengen und auch bei begrenzten Flächenverfügbarkeiten für eine vorgeschaltete Pflanzenkläranlage die Potenziale des Grauwassers dennoch gezielt nutzen zu können, sollte in Folgeforschungen überprüft werden, ob und welche Pflanzenarten mit einer direkten Bewässerung durch lediglich gefiltertes, jedoch nicht vollständig aufbereitetes Grauwasser gedeihen. Alternativ könnten technische System der Grauwasseraufbereitung, z.B. Membranfiltrationsanlagen, zum Einsatz kommen.

## 8.2. Fazit

Im Folgenden werden differenziert nach den bearbeiteten Arbeitspaketen die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt sowie die durchgeführten Datenerhebungen und angewendeten Methoden kritisch reflektiert. Schließlich wird auf potentielle Forschungsthemen bei weiterer Nutzung des bestehenden Forschungsdachs sowie auf weitergehenden Forschungsbedarf hingewiesen.

### Arbeitspaket 1 Öffentlichkeitsarbeit

Die im Vergleich zu den Vorjahren im Jahr 2023 sehr gut besuchte Präsentation des Forschungsdaches im Rahmen der Gartenspaziergänge spiegelt das inzwischen deutlich gesteigerte Interesse an Themen der Klimaanpassung und den erhöhten Bedarf an Umweltbildung in diesem Themenfeld wider. Die Präsentation des Daches könnte und sollte demnach in Zukunft noch stärker Bestandteil der vom botanischen Garten regelmäßig angebotenen Führungen werden.

Auf wissenschaftlicher Ebene wurde das Forschungsprojekt auf mehreren, auch internationalen Kongressen präsentiert, jedoch konnten bisher keine Ergebnisse präsentiert werden, da die Aufbereitung und Validierung der Daten erst nach der Messkampagne im Jahr 2022 bei voll entwickelter Vegetation möglich war. Entsprechend ist nunmehr beabsichtigt auf der Basis dieses Abschlussberichtes, der die Ergebnisse aller Arbeitspakete vergleichbar darstellt, umfassende Fachpublikationen zu starten.

### Arbeitspaket 2 Vitalität und Ästhetik

Die Auswertung des Bonituren zeigt für den trockenen und heißen Sommer 2021 sehr deutlich, dass bei Bewässerung mit maximalen Bewässerungsregime (2,4 l/d) gegenüber dem medialen (1,2 l/d) und minimalen (0,6 l/d) überwiegend die höchsten Bewertungen erreichen werden. Allerdings bildet sich die Verdopplung der Bewässerungsmenge von medial zu maximal (+1,2 l/d) gegenüber minimal zu medial (+0,6 l/d) bei den meisten bewerteten Parametern, z.B. auch beim Deckungsgrad nicht proportional ab. Insgesamt ist festzustellen, dass sich auch mit der medialen Bewässerung ein Deckungsgrad von durchgängig 80 % (95 bis 100 % bei max.) erzielen lässt. Bei Feldern mit minimalen Bewässerungsregime fällt der Deckungsgrad dagegen in der Trocken- und Hitzeperiode auf 62 % ab, jedoch bei dennoch in der Regel mindestens mittlerem Erscheinungsbild und überwiegend grünem Blattwerk. In Folge des geringeren Deckungsgrades in den minimal bewässerten Feldern ist den Perioden mit höheren Niederschlägen und kühleren Temperaturen ab dem Spätsommer ein erhöhtes Aufkommen von Fremdaufwuchs und damit von Pflegebedarf festzustellen.

Die häufigere Bewässerung führt nicht nur zu einem ästhetischen Mehrwert, sondern auch zu einem artspezifisch proportional mit der Bewässerungsmenge steigenden verdunstende Vegetationsvolumen und bei den sommerblühenden Arten zu einer

deutlich größeren Blütenmenge und damit zu einem erhöhten Nahrungsangebot für Insekten.

Demgegenüber zeigen die mit vermeintlich trockenheitsverträglichen Arten bepflanzten Nebenflächen im heißen und trockenen Sommer 2022 bereits bei der Bonitur vom 24.06. überwiegend braunes Blattwerk, ein Unterbleiben weiterer Blütenentwicklung. Weite Teile der Vegetation waren 2023 abgestorben (Abbildung 4.3-33), während selbst die minimal bewässerten Forschungsfelder sich ganzjährig grün und relativ vital darstellten.

In Reflexion der Erhebungsmethoden muss festgestellt werden, dass die Boniturbögen in einzelnen Parametern zur Präzisierung (Anzahl der Individuen einer Art blühender und auffälliger Individuen) und in anderen zur Vereinfachung (Deckungsgrad Beikräuter statt Zählung, Erhebung Zeitaufwand der Entfernung) der Erhebungen angepasst und weiterentwickelt werden könnten.

Der Methodenvergleich der Deckungsgraderhebung zeigt, dass es bei vergleichbarer Gesamttendenz teilweise deutliche Abweichungen zwischen der optischen und der fotografisch-graphisch berechneten Auswertung gibt. Mit Blick auf die sehr aufwendige graphische Berechnung wird die Entwicklung von Verfahren zur automatisierten Klassifikation empfohlen. Des Weiteren bleibt festzustellen, dass mit der nunmehr vorliegenden Auswertung einer Vegetationsperiode mit voller Pflanzenentwicklung die Daten zwar eine deutliche Tendenz der Ergebnisse widerspiegeln, aber eine Validierung dieser durch eine Wiederholung der Erhebungen dringend geboten ist.

### Arbeitspaket 3 Wasserbilanz, Stoffbilanz, Abflussprozesse

Durch die Untersuchungen wurde deutlich, dass die Wasserspeicherung im verwendeten Dachbegrünungssubstrat durch die gute hydraulische Leitfähigkeit begrenzt ist. Regelmäßige Bewässerungsgaben mit geringen Höhen von maximal fünf Litern pro Quadratmetern vermindern signifikant den Trockenstress der Vegetation und können in Trockenperioden weitgehend in Verdunstung umgesetzt werden. Die daraus resultierende höhere Bodenfeuchte vermindert allerdings auch das Rückhaltevermögen bei Regenereignissen. Auf Grundlage von Wasserbilanzsimulationen konnten allgemeingültige Dimensionierungsansätze für die Wasserbereitstellung und -speicherung zur Versorgung bewässerter Dachbegrünungen ermittelt werden.

Im Hinblick auf die verwendete Messtechnik zeigte sich, dass sowohl die Messung von Wassergehalten im Substrat als auch die Abflussmessung aus den Messparzellen mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist. Für die Substratmessung wurde auf Grundlage umfangreicher Literaturrecherche und im Austausch mit anderen Forschungsgruppen ein Defizit an zuverlässiger Sensorik identifiziert. Hier sollten weitere systematische Untersuchungen erfolgen, bei denen ein Sensorvergleich (Messprinzip, Geometrie), Substrateigenschaften (Grobkornanteil, Material, Leitfähigkeit) und Einbausituation Berücksichtigung finden. Für die Durchflussermittlung erwiesen sich die Wasserstands-Durchfluss-Beziehungen in den verschiedenen Behältern und im zeitlichen

Verlauf als zu variabel. Hier sollten direkte Messmethoden (magnetisch-induktive Messung, Massendifferenzen) zum Einsatz kommen.

In den bisherigen Untersuchungen konnten die Messungen durch eine Bilanzsimulation plausibilisiert werden. Für die Parametrisierung hydrodynamischer Niederschlag-Abflussmodelle wurde eine umfangreiche Datengrundlage gelegt, die es ermöglicht, die hydrologischen Prozesse besser zu differenzieren und die Ergebnisse der Untersuchungen am Standort auf andere Standorte und für andere Systemkonfigurationen zu übertragen.

#### Arbeitspaket 4 Bauklimatische Untersuchungen des Kühlpotentials

Der Fokus der bauklimatischen Untersuchungen wurde auf das hygrothermische Verhalten der Dachkonstruktion bei variierenden Klimarandbedingungen, Bepflanzungen, Schichtaufbauten und Bewässerungsregimen gelegt. Aus den Temperaturmessungen innerhalb der Dachkonstruktionen konnte festgestellt werden, dass die Verhältnisse mit zunehmender Bewässerung deutlich ausgeglichener sind. Im Sommer zeigt das bewässerte Feld eine deutlich geringere maximale Substrattemperatur von ungefähr 35°C im Vergleich zu 50°C in den unbewässerten Feldern und im Kiesfeld. Im Winter hingegen beeinflusst eine dickere Substratschicht und vorhandene Pflanzendecke in Kombination mit einem erhöhten Feuchtegehalt die Temperaturen positiv. Die meisten Felder bleiben im frostfreien Temperaturbereich, nur die zwei unbewässerten Felder und das Kiesfeld zeigen Temperaturen unterhalb der Frostgrenze. Obwohl eine ähnliche amplitudendämpfende Wirkung für die Feuchtigkeit erwartet wurde, zeigte sich ein gegenteiliges Muster. Bei stärkerer Bewässerung war die Variation im Feld über das Jahr gesehen größer. Eine Ursache dafür ist der Umstand, dass die Messdaten sowohl die Bewässerungs- als auch die Winterphase berücksichtigen. Bei einer ausschließlichen Betrachtung der Bewässerungsphase würde sich die erwartete gedämpfte Schwankung mit zunehmender Bewässerung zeigen. Unabhängig davon schlägt sich eine intensivere Bewässerung jedoch in einem erhöhten mittleren Feuchteniveau nieder, was eine erheblich erhöhte Wärmespeicherkapazität bedingt. In ihrer Auswirkung auf die Temperaturverhältnisse ist diese feuchtebedingte Speicherfähigkeit dominant und liegt deutlich über der Kühlwirkung der durch die Pflanzendecke verursachten Evapotranspiration. Für den Beispielmonat August 2022 lässt sich der Dämpfungseffekt auf mehr als 10 K Temperaturabsenkung am Tag beziffern, während der Absenkungseffekt durch die Kühlwirkung der Bepflanzung (Evapotranspiration) lediglich 2 K ausmacht. Die höchsten Unterschiede sind zwischen dem unbewässerten und dem medial bewässerten Feld zu erkennen, die Verbesserung zum maximal bewässerten Feld ist marginal.

Es zeigten sich auch Herausforderungen und Unsicherheiten in der Messdatenauswertung, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. So wurden beispielsweise unplausible Werte in den Hydraprobe-Feuchtemessungen festgestellt, wie z.B. Feuchtegehalte über dem maximalen

Porenvolumen des Substrats. Zusätzlich stellten die Zeitverläufe der Feuchtemessungen eine größere Hürde dar. Die Wägung zeigte zyklische Schwankungen und Wertesprünge, wobei erstere auch durch Signalzerlegung nicht beseitigt werden konnten. Die redundanten Messungen der lokalen Feuchtegehalte waren in ihrem Verlauf stark schwankend und in der Auswertung der Feuchtegehaltsänderung zu einem erheblichen Zeitanteil widersprüchlich zur Wägung. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor in der Datenauswertung ist das Zusammenspiel der Klimarandbedingungen auf den Einzelfeldern. Diese sind in Bezug auf die Strahlungseinträge und vermutlich auch hinsichtlich der Niederschlags- und Windverhältnisse nicht identisch, was eine detaillierte Gegenüberstellung der Felder vereitelt. Hier wären ergänzende Untersuchungen und ggf. Messungen notwendig.

Ungeachtet dieser Unsicherheiten lässt sich aus bauklimatischer Sicht ein eindeutiges Fazit ziehen. Die größte Auswirkung eines Gründachs besteht in der erhöhten Wärmespeicherkapazität in Folge eines erhöhten Wassergehaltes. Folglich ist, um einen sommerlich günstigen mikroklimatischen Effekt durch das Gründach zu erzielen, eine standort-, substrat- und pflanzenangepasste Bewässerung essenziell. Aus Praxissicht wäre für die Ermittlung dieses Optimums der Bedarf von Richtwerten gegeben. Diese könnten mit Hilfe angepasster hygrothermischer Modelle ermittelt werden. Das setzt allerdings voraus, dass diese Modelle die Wechselwirkung zwischen dem Substrat, den Pflanzen und dem Umgebungsklima für unterschiedliche Bewässerungsregime gut abbilden, was derzeit nicht der Fall ist. So stellt die hygrothermische Modellierung des losen Substrats eine Herausforderung dar, die Abbildung der pflanzlichen Kühlwirkung in Abhängigkeit der Wasserverfügbarkeit im Substrat eine weitere. Hier besteht Forschungsbedarf.

#### Arbeitspaket 5 Stadtklimatische Bewertung des Kühlpotenzials

Die räumliche Verteilung der Oberflächentemperatur der unterschiedlich bewässerten Lysimeterfelder des Gründachs zeigt unter sommerlichen Strahlungsbedingungen einen hohen statistischen Zusammenhang zum Pflanzenbedeckungsgrad und zum Grünvolumen.

Auf die folgenden Punkte ist hinzuweisen:

- Der Standort der im Projekt installierten Klimastation wird bzgl. Wind und Strahlung stark von der unmittelbaren Umgebung (hohe Bäume, Verwaltungsgebäude) beeinflusst. Die Daten der Klimastation repräsentieren die mikroklimatischen Randbedingungen für das Gründach adäquat, sollten aber nicht als Referenz für die Mikroklimabedingungen im Botanischen Garten verwendet werden.
- Der in den Mittagsstunden über den südlichen Teil des Gründachs wandernde Schatten des Dienstgebäudes beeinflusst die Verdunstung der Lysimeterfelder unterschiedlich. Dies muss bei Berechnungen des Wasserhaushalts auf dem Gründach berücksichtigt werden.

- Die mikroklimatische Variabilität auf den unterschiedlich bewässerten Lysimeterfeldern und die Randwirkung des Gründachs (abgebildet durch räumliche Gradienten von Temperatur und Feuchte) ist mit der aktuellen Messkonfiguration nicht ausreichend abbildbar. Hierfür muss eine räumliche Verdichtung der Messsensorik auf dem Gründach und im Bereich zwischen Gründach, Klimastation und Referenzstation erfolgen. Dies sollte Bestandteil eines im Rahmen des Projektes abgestimmten Messkonzeptes sein.
- Das ausgewählte Messequipment für Niederschlag (Wippe) ist recht fehlerbehaftet. Der Ersatz durch eine Niederschlagswaage wird empfohlen.

### **Weiterer Forschungsbedarf unter Nutzung des bestehenden Forschungsdachs**

Um diese Ergebnisse zu verifizieren und insbesondere um im Zuge der Bearbeitung aufgetretene Auffälligkeiten näher zu untersuchen, strebt das Team einen Projektantrag für weitergehende Untersuchungen an.

Im Folgenden ist eine Übersicht über den aus den Ergebnissen abgeleiteten Forschungsbedarf gegliedert nach Arbeitspaketen zusammengestellt.

#### Vitalität und Ästhetik

- Untersuchung der Pflanzenverträglichkeit bei Bewässerung mit grobgefiltertem Grauwasser
- Erweiterung des untersuchten Artenspektrums durch Ergänzungsbepflanzungen
- Automatisierung der Vegetationsaufnahme durch Entwicklung von Verfahren zur automatisierten Klassifikation von Vegetation in multi-modalen UAV-Daten für den speziellen Anwendungsfall der Quantifizierung des Deckungsgrades
- Untersuchung geeigneter geometrischer und radiometrischer Merkmale für eine Vegetationserkennung in unterschiedlichen saisonalen Zuständen
- Langzeitmonitoring der unbewässerten Nebenflächen: Erkenntnisse über extrem trockenheitsverträgliche Stauden und Gräser

#### Wasserbilanz, Stoffbilanz, Abflussprozesse

- Untersuchung der Wasserrückhalteigenschaften verschiedener Dachsubstrate und potentielle Optimierung der Substratretention: der hohe Anteil an großen Korndurchmessern und die hohe Wasserleitfähigkeit des verwendeten Substrats bewirkten präferenzielle Fließwege bereits Abfluss, wenn die Feldkapazität noch nicht ausgeschöpft ist. Künftige Forschung sollte diesen schnellen Abflussanteil systematisch quantifizieren und Substratzusammensetzungen identifizieren, die den schnellen Abfluss abmindern
- Modellbasierte Optimierung der Bewässerung von Dachbegrünungen zur Unterstützung des urbanen Wasserhaushalts: die bisherigen Versuche haben gezeigt, dass die Bewässerung zu erhöhter Verdunstung aber auch verminderter

Retention bei Regenereignissen führt, aus Messungen und Modellierungen sollen optimierte Wassergaben für verschiedene Zielstellungen abgeleitet werden

- Bilanzierung von Stoffaustrag und Ereignisdynamik aus bewässerten Dachbegrünungen: Ereignisbezogene Beprobung von Ablaufereignissen und Charakterisierung der Ablaufqualität in Abhängigkeit von Bewässerungsintensität und Regenkenngößen
- Nutzung von Grauwasser zur Direktbewässerung von Dachbegrünung: Bewertung von Potentialen für die direkte Reinigung von Grauwasser in Dachbegrünungen: Versuche mit grob filtriertem Grauwasser zur Bewertung des Stoffrückhalts und Anforderungen an die Beschickung, Potentialbewertung von substratbasierten Dachbegrünungen für die Reinigung von Grauwasser
- Systematischer Vergleich von Sensoren für die Erfassung der Bodenfeuchte in Dachsubstraten: die bisherigen Untersuchungen und auch die Ergebnisse andere internationaler Studien haben gezeigt, dass zahlreiche Bodenfeuchtesensoren die reale Bodenfeuchte nur sehr unsicher erfassen. In breit angelegten Labor und Feldversuchen sollten Sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien und Geometrien auf ihre Eignung getestet werden.
- Entwicklung eines Referenzdatensatz für die Kalibrierung und Optimierung von Wasserhaushaltsmodellen für blaugüne Infrastruktur mit Hilfe der umfangreichen Messdaten, die das Forschungsgründach erfasst
- Entwicklung einer Modellgestützte Optimierung der Bewässerung und Verdunstung von Gründächern mit SWMMUrbanEVA
- Entwicklung eines Planungswerkzeugs für die dynamische Bemessung von Vorratsspeichern für die Bewässerung von Dachbegrünungen

#### Bauklimatische Untersuchungen des Kühlpotentials

- Entwicklung eines ET-Vorhersagemodells für Gründächer in DELPHIN: Die aktuell verfügbaren ET-Modelle berücksichtigen die Substratfeuchte nicht (ausreichend), welche auf Gründächern stark schwankt und daher maßgeblich die Verdunstung bestimmt. Ziel ist ein solches Modell in DELPHIN implementieren und darin auch unterschiedliche Bewässerungssysteme abbildbar zu machen. Die Aussagefähigkeit könnte mit weitergehenden Messdaten aus 2023 bewertet werden.
- Das Prüfen unterschiedlicher Bewässerungszyklen und -techniken soll im Zusammenspiel mit dem gewählten Substrat erörtert werden. Ist die Flüssigwasserleitfähigkeit des Substrates zu gering, dann findet ein höherer Direktdurchfluss des Wassers statt, in diesem Fall könnte eine flächigere und zeitkonstantere Bewässerung sinnvoller sein. Bei gut flüssigwasserleitfähigen und speicherfähigen Substraten könnten auch räumlich/zeitlich ungleichmäßigere Bewässerungen stattfinden. Es ist ungeklärt, welche Kombination aus

Substratkennwert und Bewässerungsprinzip sinnvoll ist. Auch zeitliche Entmischungsprozesse könnten eine Rolle spielen.

#### Stadtklimatische Bewertung des Kühlpotenzials

- Durchführung episodischer mikro-meteorologischer Messungen direkt auf dem Gründach:
  - exakte Bestimmung der Nettostrahlung und der Verdunstung über den Feldern mit Bewässerungssteuerung
  - Ableitung von Parametrisierungen zur Abschätzung der Verdunstung und der Energiebilanz aus den Dauermessungen
  - Drohnenaufnahmen der Strahlungstemperatur zur Pixelkorrektur der Dauermessungen der IR Temperatur
  - Ausweitung der gestaffelten Temperaturmessung Oberhalb der Pflanzung
  
- Vorbereitung und Durchführung episodischer ergänzender mikro-meteorologischer Messungen am Rande des Gründachs
  - Nachweis der Fernwirkung (Kühlung und Auffeuchtung) auf die atmosphärische Umgebung (wird derzeit in der Wissenschaftscommunity viel diskutiert, aber ist sehr wenig Brauchbares dazu bisher)
  - Transekte mit low-cost Sensoren zur Bestimmung von Temperatur und Feuchte bei günstiger Wetterlage und Anströmung
  - Vergleich mit Klimastation am Gründach und Referenz (Klimastationen DWD, LHD)
  
- Konzeption und Durchführung von Modellsimulationen für Planspiele von Bepflanzungs- und Bewässerungsoptionen
  - Mikroklimamodell ENVI-met
  - Strahlungsbilanzmodell SOLWEIG
  - Ermittlung des potentiellen Kühlpotentials und der Fernwirkung des Gründachs aus mikroklimatischer Sicht
  - Übertragung der Ergebnisse in allgemeine Aussagen (Potentialanalyse)

#### Sowie zusammenfassend und übergeordnet

- Gegenüberstellung und Verknüpfung von Ergebnissen der Verdunstungsmodellierung aus verschiedenen Modellansätzen (hydrologisch, meteorologisch, bauklimatisch) und Abgleich mit der realen Verdunstung aus der Wasserbilanz

### **Weitergehender Forschungsbedarf zu einfach intensiver Dachbegrünung**

Erkenntnisse zum Zusammenspiel von Gründächern und PV-Modulen: Die Effizienz von PV-Modulen hängt stark vom Temperaturniveau ab. Dächer mit einfacher Intensivbegrünung weisen deutlich geringere und ausgeglichene Dachoberflächentemperaturen auf und damit bessere Bedingungen für eine Kombination mit PV. Ungeklärt sind hier Punkte wie die optimale Modulanordnung und Pflanzenauswahl. So dürfen bei geringem Pflegeaufwand die Pflanzen nicht die Module verdecken, sollten für die verschatteten Bereiche unter den Modulen geeignet sein, sollten eine entsprechend hohe ET-Kapazität aufweisen etc.

- Systematischer Vergleich von Substraten für Dachbegrünungen unter Berücksichtigung lokalklimatischer Besonderheiten und regional verfügbarer Böden (Optimierung Stoffkreisläufe sowie Klimaanpassungsstrategie für Dachbegrünungen)

## 9. Literatur

- BAEHR, H.D.: *Thermodynamik*. Springer Verlag., 8. Auflage, 1992.
- BATTISTA, Gabriele, Eleonora M. Pastore, Luca Mauri, und Carmine Basilicata. 2016. „Green Roof Effects in a Case Study of Rome (Italy)“. *Energy Procedia*, ATI 2016 - 71st Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, 101 (November): 1058–63. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.134>.
- BEVILACQUA, Piero, Roberto Bruno, und Natale Arcuri. 2020. „Green Roofs in a Mediterranean Climate: Energy Performances Based on in-Situ Experimental Data“. *Renewable Energy* 152 (Juni): 1414–30. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.085>.
- BMU 2003: Hydrologischer Atlas von Deutschland. Erweiterte Ausgabe 2003, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Freiburg.
- BOLLRICH, G., & PREIBLER, G. (1996). Technische Hydromechanik 1: Grundlagen. 6. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin.
- CURRIE, B. & BASS, B. (2008): Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems* 11: 409-422.
- BORRÀS, Júlia G., Carlos Lerma, Ángeles Mas, Jose Vercher, und Enrique Gil. 2022. „Contribution of Green Roofs to Energy Savings in Building Renovations“. *Energy for Sustainable Development* 71 (Dezember): 212–21. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.09.020>.
- CASCONE, Stefano, Julià Coma, Antonio Gagliano, und Gabriel Pérez. 2019. „The Evapotranspiration Process in Green Roofs: A Review“. *Building and Environment* 147 (Januar): 337–55. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.024>.
- CURRIE, B. & BASS, B. (2008): Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems* 11: 409-422.
- DETHIER, M. N.; GRAHAM, E. S.; COHEN, S.; TEAR L. M. (1993): Visual versus random – point
- DIERSCHKE, H. (1994): Pflanzensoziologie – Grundlagen und Methoden, 55 Tabellen; Ulmer; Stuttgart, S. 683.
- DWD, 2019. DATENSATZBESCHREIBUNG Berechnete tägliche Werte von charakteristischen Elementen aus dem Boden und dem Pflanzenbestand.
- DWD, 2021. DATENSATZBESCHREIBUNG Historische tägliche Niederschlagsbeobachtungen für Deutschland.
- DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST, 2014a: Deutscher Wetterdienst zum neuen Bericht des Weltklimarates (IPCC), Deutscher Wetterdienst, [online verfügbar: [www.dwd.de](http://www.dwd.de)]
- DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST, 2014b: Mittelwerte 30-jähriger Perioden, Deutscher Wetterdienst [online verfügbar: [www.dwd.de](http://www.dwd.de)].
- FACHREGELN FÜR ABDICHTUNGEN, enthalten in ZDD 2012 ZDD ZENTRALVERBAND DES DEUTSCHEN DACHDECKERHANDWERKS, 2012: Deutsches Dachdeckerhandwerk – Regeln für Abdichtungen. 5. Auflage, Köln, S. 392.

- FAO UN - Food and Agriculture Organization of the United Nations (Hrsg.), 1998: Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome.
- FEHMER, D., ANLAUF, R., REHRMANN, P., 2011, Entwicklung eines mattenartigen wasser- und energiesparenden Unterflur-Bewässerungssystems für Anwendungen in mitteleuropäischem und aridem Klima. Abschlussbericht zum Teilprojekt Bodenphysikalische Untersuchungen zur Unterflur-Bewässerungsmatte, Osnabrück FISCHER & KLOTZ 1996.
- FLL, FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDESENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E.V. (2015) Bewässerungsrichtlinie – Richtlinie für Planung, Bau und Instandhaltung von Forschungsgesellschaft Landesentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (Hrsg.), Bonn, S. 150.
- FLL, FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDESENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E.V., 2018: Richtlinie für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen, Forschungsgesellschaft Landesentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (Hrsg.), Bonn, S. 150.
- GHOLAMI, Mansoureh, Alberto Barbaresi, Patrizia Tassinari, Marco Bovo, und Daniele Torreggiani. 2020. „A Comparison of Energy and Thermal Performance of Rooftop Greenhouses and Green Roofs in Mediterranean Climate: A Hygrothermal Assessment in WUFI“. *Energies* 13 (8): 2030. <https://doi.org/10.3390/en13082030>.
- GRUNEWALD, John, Andreas Nicolai, Anne Paepcke, und Heiko Fechner. 2023. „DELPHIN“. Windows 64-Bit. C++. Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Luft-, Feuchte-, Schadstoff- und Salztransport. Dresden: Bauklimatik-Dresden. <https://www.bauklimatik-dresden.de/delphin/>.
- HÄNICKE, Philipp 2022. "Bauphysikalische Messdatenanalyse für Gründach-Testfelder auf dem Gelände des Botanischen Gartens in Dresden", Diplomarbeit am Insitut für Bauklimatik, TU Dresden, Dresden.
- HÄUPL, P., PETZOLD, H.: Hygrothermische Untersuchungen an begrünten Flachdächern. 12. Bauklimatisches Symposium Dresden, Tagungsband, 2007.
- HÖRNSCHEMEYER, B.; HENRICH, M.; UHL, M. (2021): SWMM-UrbanEVA: A Model for the Evapotranspiration of Urban Vegetation. In: *Water* 13 (2), S. 243
- HÖSCHELE, K. & SCHMIDT, H. (1974): Klimatische Wirkung einer Dachbegrünung. In: *Garten und Landschaft*, Heft 6, 334-337.
- JAHANFAR, Ali, Jennifer Drake, Brent Sleep, und Bahram Gharabaghi. 2018. „A Modified FAO Evapotranspiration Model for Refined Water Budget Analysis for Green Roof Systems“. *Ecological Engineering* 119 (August): 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.021>.
- JAUCH, M., KRUMMRADT, I., SCHMITZ H.-J., LOHR, D., MEINKEN, E.; 2016: Optimierung der Evapotranspirations- und Kühlleistung extensiver Dachbegrünungen durch gezielte Nutzung von Grauwasser, Freising.

- KOLB, W., (2003): Gute Gründe für die Dachbegrünung - Gründach und Regenwasser, In: Veitshöchheimer Berichte aus der Landespflge, Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Heft 72, S 3-11.
- KOLB, W.; SCHWARZ, T. (2009): Zum Klimatisierungseffekt von Pflanzenbeständen auf Dächern – Teil I: Kühlleistung verschiedener Gräser-Kräuter-Mischungen und Stauden bei Intensivbegrünungen. In: Veitshöchheimer Berichte, Ausgabe 131, Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Veitshöchheim, S. 141-146.
- KÖNIG, K. (2011): Problemstandorte bepflanzen mit bodendeckenden Stauden.
- KÜNZEL, H.M. (1996): Feuchteverhalten begrünter Umkehrdächer. Sonderdruck aus BbauBl 45.
- KÜNZEL, Hartwig, Simon Schmidt, und Daniel Zirkelbach. 2023. „WUFI 2D“. Windows 64-Bit. WUFI. Stuttgart: Fraunhofer Institut für Bauphysik.  
<https://wufi.de/en/software/wufi-pro/>.
- LARCHER, W. (2001): Ökophysiologie der Pflanzen-Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt, 77 Tabellen. 6. Auflage, Ulmer, Stuttgart, 408 S.
- LEE, H., 2021: Thermal response and implications on water balance of differently vegetated semi-intensive green roofs. Master's Thesis. TU Dresden. 26.04.2021.
- LOHAUS, I. (2015): Urbane Vegetation als Regenwassermanager, In: Jahrbuch der Baumpflge 2015, Haymarket Media, 19. Auflage
- LÖSKEN, G.; Westerholt, D. (2019): Neues Verfahren zur vereinfachten Bestimmung des Deckungsgrads bei Extensivbegrünungen. Vortrag zum 16. BuGG-Gründachsymposium 2019. Erreichbar unter  
<https://www.gebaeudegruen.info/service/downloads/bugg-vortraege/gruendachsymposium-2019>, Zugriff am 12.4.2021
- MINKE, G. et.al: Ermittlung des Wärmedämmverhaltens von Gründächern. Abschlussbericht ZUB Kassel, 2009:
- MKULNV, MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, 2011: Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Düsseldorf, 66 S.
- MORAKINYO, Tobi Eniolu, K.W.D.Kalani.C. Dahanayake, Edward Ng, und Cheuk Lun Chow. 2017. „Temperature and Cooling Demand Reduction by Green-Roof Types in Different Climates and Urban Densities: A Co-Simulation Parametric Study“. *Energy and Buildings* 145 (Juni): 226–37. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.066>.
- MUELLER-DOMBOIS, D. & ELLENBERG, H. (1974): Aims and methods of vegetation ecology. John WILEY & SONS, New York. 547 S.
- OBERDORFER, E. (2001): Pflanzensoziologische Exkursionsflora. Ulmer, Stuttgart. S. 1051.

- OTENG-PEPRAH, M.; AGBESI ACHEAMPONG, M.; DEVRIES N.K. 2018: Greywater Characteristics, Treatment Systems, Reuse Strategies and User Perception—a Review. *Water Air Soil Pollut.* 2018; 229(8): 255, doi: 10.1007/s11270-018-3909-8
- percentage cover estimations: "objective" is not always better. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 96: 93-100.
- PEROVIC, Zoran, Stanko Coric, Snezana Isakovic, und Dragoslav Sumarac. 2023. „Potential and Benefit of Green Roof Energy Renovation of Existing Residential Buildings with a Flat Roof in Belgrade“. *Applied Sciences* 13 (13): 7348.  
<https://doi.org/10.3390/app13137348>.
- PFADENHAUER, J. (1997): Vegetationsökologie. 2. Auflage. IHW-Verlag, Eching. 448 S.
- REIF, Jonas (2010): Foerster-Stauden Kompendium – 100 Jahre Foerster-Stauden in Potsdam-Bornim. Foerster –Stauden GmbH, Potsdam.
- SALCHEGGER, H., 2010: Auswertung einer 4- jährigen Versuchsfläche mit extensiven Dachbegrünungen an der Fachschule Laimburg,“ Laimburg
- SCHAFACZEK, B., ZIRKELBACH, D. (2013): Ermittlung von Materialeigenschaften und effektiven Übergangsparmetern von Dachbegrünungen zur zuverlässigen Simulation der hygrothermischen Verhältnisse in und unter Gründächern bei beliebigen Nutzungen und unterschiedlichen Standorten, IBP-Bericht Holzkirchen.
- SCHMEIL, O. & FITSCHEN, J. (BEGR.) (2008): Flora von Deutschland und angrenzender Länder. 94. Aufl. bearbeitet Seybold, S., Quelle & Meyer, Wiebelsheim. 864 S.
- SCHÖNFELD, P. (2014): Forschungsergebnisse. Pflanzenauswahl für beschattete Extensivbegrünungen. In: tagungsband zum 12. Internationalen FBB- Gründachs-symposium, Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V. (FBB), Ditzingen.
- SEIDEL, A., 2012: Klimaanalyse für die Planungsregion Leipzig-West-sachsen und den Südraum Leipzig. Expertise zum Modellvorhaben der Raumordnung (MORO) „Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel“- Phase II (Verstetigung), Regionaler Planungsverband Leipzig-West-sachsen (Hrsg.), Leipzig, 33 S.
- SINSEL, T., 2021: Advancements and Applications of the Microclimate Model ENVI-Met. Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- STEVENS 2018: Stevens Water Monitoring Systems (2018): HydraProbe User’s Manual. Januar 2018. Rev. IV.
- TAM, V.; WANG, J.; LE, K. (2016): Thermal insulation and cost effectiveness of green-roof systems: An empirical study in Hong Kong
- THEODOSIOU, T.G. (2003): Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy and Buildings* 35.
- TRAXLER, A. (1997): Handbuch des vegetationsökologischen Monitorings. Methoden, Praxis, angewandte Projekte. Teil A: Methoden. Umweltbundesamt Österreich. Monographien 89 A. 397 S.
- TREMP, H. (2005): Aufnahme und Analyse vegetationsökologischer Daten. Eugen Ulmer Verlag. Stuttgart. 141 S.

- UHL, M., HENRICHS, M., LANGNER, J., (2014): Bilanzierung des lokalen Niederschlagswasserhaushaltes in Siedlungen nach DWA-A 102. In: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.): Tagungsunterlagen der 13. Regenwassertage 1./2. Juli 2014 in Dresden, DWA, Hennef, 2014.
- WEIß, JÖRG (2016): Anpassung an trockene Standorte - Am Beispiel der Blätter der Welwitschie und des Zylindrischen Bogenhanfs im mikroskopischen Präparat. Vortrag im Rahmen des Mikroskopiker-Treffens Dörnberg IV.
- ZANKE, U. (2012). *Hydraulik für den Wasserbau*. Springer-Verlag.
- ZEHNSDORF, A. (2018): Verdunstungsintensive Gründächer für das Regenwassermanagement - Sumpfpflanzen zur Dachbegrünung. In: GebäudeGrün, 2/2018, S. 19-22.
- ZEHNSDORF, A.; KNECHTEL, S.; TRABITZSCH, R. (2018): Sumpfpflanzendächer – Stand der Anwendung und Forschung.
- ZIMMERMANN, L., RASPE, S., SCHULZ, C., GRIMMEISEN, W., 2008: Wasserverbrauch von Wäldern-Bäume und Bestände verdunsten unterschiedlich stark. In: Olaf Schmidt, Dr. Joachim Hamberger (Hrsg.): LWF aktuell – Magazin der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft und Mitgliederzeitschrift des Zentrums Wald-Forst-Holz Weihenstephan 66/2008, S. 16-20.
- ZIRKELBACH, Daniel. 2017. „Green Roofs– Hygrothermal Simulation of Moisture and Energy Performance“. *Proceedings of the 1st International Conference on Construction Materials for Sustainable Future Zadar, Croatia, April.*

## 10. Anhang

### 10.1. Aufbau Bonitur-Umfrage

Auszüge aus der Online-Abfrage für die Bonitur via SoSciSurvey.

**3. Wie ist das Erscheinungsbild der Pflanzung?**  
Bewerten Sie den Gesamteindruck.  
Der Parameter „Erscheinungsbild“ beschreibt den ersten Eindruck der Pflanzung auf die Begutachter:in. Bewertet wird die artspezifische Ausformung des Habitus und der Artmerkmale (artspezifisch abgestorbene Pflanzenteile werden nicht in die Betrachtung und Bewertung miteinbezogen). Pflanzen, die aufgrund externer Faktoren (Vandalismus, Tierfraß,...) ausgefallen sind, werden von der Bewertung ausgeschlossen.

sehr schlecht     schlecht     mittelmäßig     gut     sehr gut     ausgezeichnet

**4. Wie hoch ist der Deckungsgrad?**  
Geben Sie den ermittelten Deckungsgrad in Prozent an.

0 – 19 %     20 – 39 %     40 – 59 %     60 – 79 %     80 – 100 %

Seite 04

**5. Sind wild aufwachsende Arten auf der Fläche festzustellen?**

ja  
 nein

**6. Wie viele Pflanzen sind wild aufgewachsen?**  
Ermitteln Sie die Gesamtanzahl. Im nächsten Schritt werden die Arten/Gattungen benannt.

Stück

Seite 06

**7. Wie viele der gepflanzten Arten sind jeweils potenziell ausgefallen?**  
Halten Sie die Anzahl je Art fest.

|              |                               |
|--------------|-------------------------------|
| Geranium     | <input type="text"/><br>Stück |
| Lysimachia   | <input type="text"/><br>Stück |
| Bistorta     | <input type="text"/><br>Stück |
| Brunnera     | <input type="text"/><br>Stück |
| Bergenia     | <input type="text"/><br>Stück |
| Heuchera     | <input type="text"/><br>Stück |
| Kirengeshoma | <input type="text"/><br>Stück |
| Telekia      | <input type="text"/><br>Stück |

**9. Wo befinden sich Pflanzen mit Schadbildern?**

Wählen Sie die Positionsnummer der Pflanzen mit Gesundheitsschäden aus.

**Positionsnummer**

- 1.1
- 1.2
- 1.3
- 1.4
- 1.5
- 1.6
- 1.7
- 1.8
- 1.9
- 1.10
- 1.11
- 2.1
- 2.2
- 2.3
- 2.4
- 3.1
- 3.2
- 4.1
- 4.2
- 4.3
- 4.4
- 4.5
- 4.6
- 4.7
- 5.1
- 5.2
- 5.3
- 5.4
- 5.5
- 5.6

**11. Wie ist die Wuchshöhe der gepflanzten Arten?**

Halten Sie die Wuchshöhe im Durchschnitt fest.

Bei keinem vorhandenen Blütenstand ist eine 0 einzutragen.

|                              |    |                      |
|------------------------------|----|----------------------|
| Geranium<br>Minimalhöhe      | cm | <input type="text"/> |
| Geranium<br>Maximalhöhe      | cm | <input type="text"/> |
| Geranium<br>Blütenstandshöhe | cm | <input type="text"/> |
| Lysimachia<br>Minimalhöhe    | cm | <input type="text"/> |
| Lysimachia<br>Maximalhöhe    | cm | <input type="text"/> |
| Bistorta<br>Minimalhöhe      | cm | <input type="text"/> |
| Bistorta<br>Maximalhöhe      | cm | <input type="text"/> |
| Bistorta<br>Blütenstandshöhe | cm | <input type="text"/> |
| Brunnera<br>Minimalhöhe      | cm | <input type="text"/> |
| Brunnera<br>Maximalhöhe      | cm | <input type="text"/> |
| Brunnera<br>Blütenstandshöhe | cm | <input type="text"/> |
| Bergenia<br>Minimalhöhe      |    | <input type="text"/> |

### 12. Wie hoch ist der Schädlings- und Krankheitsbefall?

Ermitteln sie die optische Widerstandsfähigkeit der Pflanzen, in dem sichtbarer Schädlings- und Krankheitsbefall festgehalten wird.

Legende:

9 kein Schädlings- und Krankheitsbefall

8

7 vereinzelter Schädlings- und Krankheitsbefall

6

5 mäßiger Schädlings- und Krankheitsbefall

4

3 starker Schädlings- und Krankheitsbefall

2

1 total Schädlings- und Krankheitsbefall

|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

Geranium

|                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

Lysimachia

|                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

Bistorta

|                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

Brunnera

|                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

Bergenia

|                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

Heuchera

|                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

### 14. Wie ist das Blühverhalten ausgeprägt?

Die Parameter werde nur zum artspezifischen Blühzeitpunkt aufgenommen. Aufnahme zum artspezifischen Blühzeitpunkt, Anmerkungen bei artuntypischem Blühverhalten im nächsten Schritt.

Legende:

9 sehr viele Blüten

8

7 zahlreiche Blüten

6

5 normal viele Blüten

4

3 wenige Blüten

2

1 keine Blüten

|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

Geranium

|                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

Lysimachia

|                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

Bistorta

|                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

Brunnera

|                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

Bergenia

|                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

### 19. Wie gesund sind die Blätter?

Ermitteln Sie die Blattgesundheit (Mittelwert) bei den Pflanzenarten. Der Parameter beschreibt den Zustand der Blätter der aufgenommenen Pflanze, artspezifische Charakteristika müssen beachtet werden (z.B. Festigkeitsgrad der Blätter, Farbintensität, Verfärbungen,...).

Legende:

9 sehr gesund (glänzend, kräftig, saftig, prall, farbintensiv)

8

7 gesund (gut im Saft, druckresistent)

6

5 mäßig (blässlich)

4

3 gering (blass, hängend, weich)

2

1 schlecht (farblos, schlaff)

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Geranium

Lysimachia

Bistorta

Brunnera

Bergenia

## 10.2. Pflanzensteckbriefe

*Bergenia cordifolia*

*Brunnera macrophylla*

*Geranium x magnificum* ‚Rosemoore‘

*Heuchera villosa* var. *Macorrhiza*

*Kireneshoma palmata*

*Lysimachia punctata*

*Polygonum amplexicaule*

*Telekia speciosa*

|                  |                    |  |  |
|------------------|--------------------|--|--|
| Botanischer Name |                    | <i>Bergenia cordifolia</i>   |  |
| Deutscher Name   |                    | Altai-Bergenie   |  |
| Standort         | Familie            | Saxifragaceae  |  |
|                  | Herkunft           | Ostasien   |  |
|                  | Geselligkeit       | I-II   |  |
|                  | Lebensbereich      | GR2/Fr2  |  |
| Standort         | Licht              | sonnig, halbschattig   |  |
|                  | Winterhärtezone    | Z4   |  |
|                  | Boden              | lehmig, sandig, humos, nährstoffreich  |  |
|                  | Feuchtegrad        | frisch, durchlässig  |  |
| Beschreibung     | Höhe               | 25-30 cm   |  |
|                  | Breite             | 35-40 cm   |  |
|                  | Blatt              | wintergrün, oval, ganzrandig, derb, glänzend, rötliche Herbstfärbung, dunkelgrün   |  |
|                  | Blüte              | einfach  |  |
|                  | Blütezeit          | März-April   |  |
|                  | Blütenfarbe        | helles Purpurrosa  |  |
|                  | Blütenform         | glockenförmig  |  |
|                  | Blütengröße        | >5cm   |  |
|                  | Frucht             | Kapsel, unscheinbar  |  |
|                  | Wuchsform          | Aufrechte Stängel, horstig, dicht, kompakt, bodendeckend   |  |
| Wuchsverhalten   | rhizombildend      |  |  |
| Verwendung       | Charaktergruppe    | Wildstaude mit Beetstaudencharakter  |  |
|                  | Hierarchie         | Begleitstaude, Füllstaude  |  |
|                  | Einsatzorte        | Gehölzrand, Freifläche, Rabatte, Bodendecker   |  |
|                  | Besonderheiten     | Bienenweide, pflegeleicht, kein Schneckenfraß, Schnittblume, Kübelpflanzung, Blattschmuck, magere Böden steigern, trocken verträglich, Herbstfärbung, Unterpflanzung |  |
|                  | Pflanzung / Pflege | 40cm , 6-8 St./m <sup>2</sup> ; Rückschnitt nach Blüte   |  |

|                  |                                  |   |  |
|------------------|----------------------------------|---|--|
| Botanischer Name |                                  | <i>Brunnera macrophylla</i>   |  |
| Deutscher Name   |                                  | Kaukasus-Vergissmeinnicht   |  |
|                  | Familie                          | Boraginaceae  |  |
|                  | Herkunft                         | Wälder Osteuropa, Nordwestasien   |  |
|                  | Geselligkeit                     | I-II  |  |
| Standort         | Lebensbereich                    | GR/G2   |  |
|                  | Licht                            | halbschattig, schattig  |  |
|                  | Winterhärtezone                  | Z3  |  |
|                  | Boden                            | lehmig, humos, nährstoffreich   |  |
|                  | Feuchtegrad                      | frisch, durchlässig   |  |
| Beschreibung     | Höhe                             | 20-40 cm  |  |
|                  | Breite                           | 30-40 cm  |  |
|                  | Blatt                            | sommergrün, herzförmig, rau, stumpf, groß, 5-20cm lang, dunkelgrün, gelbe Herbstfärbung                       |  |
|                  | Blüte                            | einfach   |  |
|                  | Blütezeit                        | April-Mai   |  |
|                  | Blütenfarbe                      | hellblau  |  |
|                  | Blütenform                       | rispenförmig  |  |
|                  | Blütengröße                      | >5cm  |  |
|                  | Frucht                           | Nüsschen, unscheinbar   |  |
|                  | Wuchsform                        | horstartig, breitbuschig  |  |
| Wuchsverhalten   | langsam kriechend, Selbstaussaat |   |  |
| Verwendung       | Charaktergruppe                  | Wildstaude  |  |
|                  | Hierarchie                       | Füllstaude Blattschmuckstaude   |  |
|                  | Einsatzorte                      | Gehölzrand, Bodendecker, Unterpflanzung   |  |
|                  | Besonderheiten                   | Schnittblume, verwildernd, kalktolerant,  |  |
|                  | Pflanzung / Pflege               | 30-40cm , 6 St./m <sup>2</sup> ; bei Trockenheit wässern, Rückschnitt nach Blüte, ggf. Düngung mit Hornspänen |  |



|                  |                 |   |  |
|------------------|-----------------|---|--|
| Botanischer Name |                 | <i>Geranium x magnificum</i> ‚Rosemoore‘  |  |
| Deutscher Name   |                 | Pracht-Storchnabel  |  |
|                  | Familie         | Geraniaceae   |  |
|                  | Herkunft        | Züchtung GB   |  |
|                  | Geselligkeit    | II-III  |  |
| Standort         | Lebensbereich   | GR2/Fr2-3   |  |
|                  | Licht           | sonnig, halbschattig  |  |
|                  | Winterhärtezone | Z4  |  |
|                  | Boden           | lehmig, sandig, humos, nährstoffreich   |  |
|                  | Feuchtegrad     | frisch, durchlässig   |  |
| Beschreibung     | Höhe            | 50-60 cm  |  |
|                  | Breite          | 30-50 cm  |  |
|                  | Blatt           | sommergrün, rundlich, Blattrand gelappt, rau fein behaart, stumpfgrün, rötlichgelbliche Herbstfärbung |  |
|                  | Blüte           | einfach   |  |
|                  | Blütezeit       | Juni-Juli   |  |
|                  | Blütenfarbe     | violettblau mit dunklen Adern   |  |
| Blütenform       | schalenförmig   |   |  |



|            |                    |  |
|------------|--------------------|--|
|            | Blütengröße        | 5-10cm   |
|            | Frucht             | steril, ohne Frucht-/ Samenbildung                                   |
|            | Wuchsform          | buschig, horstig, grundständig                                       |
|            | Wuchsverhalten     | schnell ausbreitend  |
| Verwendung | Charaktergruppe    | Wildstaude mit Beetstaudencharakter                                  |
|            | Hierarchie         | Füllstaude, Gruppenstaude  |
|            | Einsatzorte        | Gehölzrand, Freifläche, Rabatte                                      |
|            | Besonderheiten     | Herbstfärbung, duftend, Bienenweide, toleriert kurze Trockenperioden |
|            | Pflanzung / Pflege | 40cm , 6-8 St./m <sup>2</sup> ; Rückschnitt nach der Blüte           |

|                  |                     |  |  |
|------------------|---------------------|--|--|
| Botanischer Name |                     | <i>Heuchera villosa var. macrorrhiza</i>   |  |
| Deutscher Name   |                     | Purpurglöckchen  |  |
|                  | Familie             | Saxifragaceae  |  |
|                  | Herkunft            | Zuchtform USA  |  |
|                  | Geselligkeit        | II   |  |
| Standort         | Lebensbereich       | GR2/Fr2b   |  |
|                  | Licht               | sonnig, absonnig, halbschattig   |  |
|                  | Winterhärtezone     | Z5   |  |
|                  | Boden               | lehmig, sandig, humos, nährstoffreich  |  |
|                  | Feuchtegrad         | trocken-frisch, durchlässig  |  |
| Beschreibung     | Höhe                | 30-70 cm   |  |
|                  | Breite              | 40-50 cm   |  |
|                  | Blatt               | wintergrün, stark behaart, rundlich, gekerbt, grundständig, limettengrün                         |  |
|                  | Blüte               | einfach  |  |
|                  | Blütezeit           | Juli-August  |  |
|                  | Blütenfarbe         | grünlichweiß   |  |
|                  | Blütenform          | rispenförmig   |  |
|                  | Blütengröße         | 5-10cm   |  |
|                  | Frucht              | Kapseln  |  |
|                  | Wuchsform           | kissenartig, locker aufrecht, halbkugelig  |  |
| Wuchsverhalten   | schnell ausbreitend |  |  |
| Verwendung       | Charaktergruppe     | Beetstaude   |  |
|                  | Hierarchie          | Füllstaude, Gruppenstaude  |  |
|                  | Einsatzorte         | Gehölzrand, als Bodendecker  |  |
|                  | Besonderheiten      | Schnittblume, kein Schneckenfraß, trockentolerant, pflegeleicht, Bienenweide, Blattschmuckstaude |  |
|                  | Pflanzung / Pflege  | 40cm , 6 St./m <sup>2</sup> ; alle 2-3 Jahre teilen  |  |

|                    |   |   |   |
|--------------------|---|---|---|
| Botanischer Name   |   | <i>Kirengeshoma palmata</i>   |   |
| Deutscher Name     |   | Wachsglocke   |   |
|                    | Familie   | Hydrangeaceae   |  |
|                    | Herkunft  | Japan   |   |
|                    | Geselligkeit  | I   |   |
| Standort           | Lebensbereich   | GR/G2   |   |
|                    | Licht   | sonnig, halbschattig  |   |
|                    | Winterhärtezone   | Z5  |   |
|                    | Boden   | humos, nährstoffreich, locker   |   |
|                    | Feuchtegrad   | frisch, durchlässig   |   |
| Beschreibung       | Höhe  | 60-120 cm   |   |
|                    | Breite  | 40-80 cm  |   |
|                    | Blatt   | sommergrün, herzförmig, spitzlappig, gegenständig, glatt, grüne Blattfarbe, keine Herbstfärbung |   |
|                    | Blüte   | einfach   |   |
|                    | Blütezeit   | September-Oktober   |   |
|                    | Blütenfarbe   | zartgelb  |   |
|                    | Blütenform  | doldenförmig  |   |
|                    | Blütengröße   | 5-10 cm   |   |
|                    | Frucht  | Kapseln   |   |
|                    | Wuchsform   | horstbildend, buschig, aufrecht   |   |
| Verwendung         | Wuchsverhalten  | ausladend   |   |
|                    | Charaktergruppe   | Beetstaude  |   |
|                    | Hierarchie  | Begleitstaude   |   |
|                    | Einsatzorte   | Gehölzrand, Gehölzrand, Beete, Rabatten   |   |
|                    | Besonderheiten  | wachsartige Blütenblätter   |   |
| Pflanzung / Pflege | 45cm , 4-6 St./m <sup>2</sup> ; kräftiger Rückschnitt im Herbst |   |   |

|                  |                 |   |   |
|------------------|-----------------|---|---|
| Botanischer Name |                 | <i>Lysimachia punctata</i>  |   |
| Deutscher Name   |                 | Gelbfelberich   |   |
|                  | Familie         | Primulaceae   |  |
|                  | Herkunft        | Süd- und Osteuropa  |   |
|                  | Geselligkeit    | II-IV   |   |
| Standort         | Lebensbereich   | GR/G2   |   |
|                  | Licht           | sonnig, halbschattig  |   |
|                  | Winterhärtezone | Z5  |   |
|                  | Boden           | lehmig-tonig, nährstoffreich  |   |
|                  | Feuchtegrad     | frisch-feucht, durchlässig  |   |
| Beschreibung     | Höhe            | 60-80 cm  |   |
|                  | Breite          | 30-40 cm  |   |
|                  | Blatt           | sommergrün, lanzettlich, zugespitzt, fein behaart, ganzrandig, derb, in dreivier Quirlen, frischgrün, keine Herbstfärbung |   |
|                  | Blüte           | einfach   |   |
|                  | Blütezeit       | Juni-August   |   |
|                  | Blütenfarbe     | gelb  |   |
|                  | Blütenform      | strahlenförmig in Rispen  |   |
|                  | Blütengröße     | <5cm  |   |
| Frucht           | Kapseln         |   |   |

|            |                    |  |
|------------|--------------------|--|
|            | Wuchsform          | aufrecht, buschig  |
|            | Wuchsverhalten     | stark ausbreitend durch Ausläufer  |
| Verwendung | Charaktergruppe    | Wildstaude   |
|            | Hierarchie         | Begleitstaude, Gruppenstaude   |
|            | Einsatzorte        | Gehölzrand, Freifläche, Teichrand, feuchte Rabatte   |
|            | Besonderheiten     | verträgt Wurzeldruck, pflegeleicht, anspruchslos, Insektenweide, kein Schneckenfraß, Schnittblume, kalktolerant, reich blühend |
|            | Pflanzung / Pflege | 40cm , 10 St./m <sup>2</sup> ; Rückschnitt im Herbst oder Frühjahr der vertrockneten Triebe                                    |

|                  |                             |   |
|------------------|-----------------------------|---|
| Botanischer Name |                             | <i>Polygonum amplexicaule (Bistorta amplexicaulis)</i>  |
| Deutscher Name   |                             | Kerzen- Knöterich   |
|                  | Familie                     | Polygonaceae  |
|                  | Herkunft                    | Himalaya  |
|                  | Geselligkeit                | I-II  |
| Standort         | Lebensbereich               | GR2/FR2-3   |
|                  | Licht                       | sonnig, halbschattig  |
|                  | Winterhärtezone             | Z5  |
|                  | Boden                       | Sandig, lehmig, humos,  |
|                  | Feuchtegrad                 | frisch-feucht   |
| Beschreibung     | Höhe                        | 100-120 cm  |
|                  | Breite                      | 50-70 cm  |
|                  | Blatt                       | sommergrün, breitlanzettlich, zugespitzt, ganzrandig, gewellt, 5-15cm lang, Blattfarbe grün, Herbstfärbung gelb |
|                  | Blüte                       | einfach   |
|                  | Blütezeit                   | Juli-Oktober  |
|                  | Blütenfarbe                 | rubinrot  |
|                  | Blütenform                  | ährenförmig   |
|                  | Blütengröße                 | 5-10cm  |
|                  | Frucht                      | unscheinbar   |
|                  | Wuchsform                   | bogig geneigt, ausladend  |
| Wuchsverhalten   | rhizombildend, Selbstausaat |   |
| Verwendung       | Charaktergruppe             | Wildstaude  |
|                  | Hierarchie                  | Leitstaude, Begleitstaude   |
|                  | Einsatzorte                 | Gehölzrand, Teichrand, Rabatten   |
|                  | Besonderheiten              | Bienenweide, Schnittblume, kein Schneckenfraß, Fruchtschmuck, kalktolerant, pflegeleicht, robust                |
|                  | Pflanzung / Pflege          | 90cm, 1 St./m <sup>2</sup> ; im Frühjahr nach Spätfrösten pflanzen, bei Bedarf Kompostgabe im Frühjahr          |



|                    |   |  |   |
|--------------------|---|--|---|
| Botanischer Name   |   | <i>Telekia speciosa</i>  |  |
| Deutscher Name     |   | Telekie, großblumiger Scheinalant  |   |
|                    | Familie   | Asteraceae   |   |
|                    | Herkunft  | Südosteuropa, in Deutschland Neophyt   |   |
|                    | Geselligkeit  | I  |   |
| Standort           | Lebensbereich   | GR2/Fr2-3  |   |
|                    | Licht   | sonnig, halbschattig   |   |
|                    | Winterhärtezone   | Z6   |   |
|                    | Boden   | lehmig, sandig, humos, nährstoffreich, kalkarm, neutral  |   |
|                    | Feuchtegrad   | frisch-feucht, durchlässig   |   |
| Beschreibung       | Höhe  | 150-180 cm   |   |
|                    | Breite  | 100-130 cm   |   |
|                    | Blatt   | sommergrün, herzförmig, groß, zugespitzt, grob gesägt, gestielt, 30cm lang, Blattfarbe grün, keine Herbstfärbung |   |
|                    | Blüte   | einfach,   |   |
|                    | Blütezeit   | Juli-August  |   |
|                    | Blütenfarbe   | orange-gelb  |   |
|                    | Blütenform  | tellerförmig, strahlenförmig, radiärsymmetrisch  |   |
|                    | Blütengröße   | 5-10cm   |   |
|                    | Frucht  | unscheinbar  |   |
| Verwendung         | Wuchsform   | buschig, horstig, aufrecht   |   |
|                    | Wuchsverhalten  | schnell ausbreitend, aussamend   |   |
|                    | Charaktergruppe   | Beetstaude   |   |
|                    | Hierarchie  | Solitärstaude, Leitstaude  |   |
|                    | Einsatzorte   | Gehölzrand, Freifläche   |   |
|                    | Besonderheiten  | Großblumige Asteraceae, Schnittblume, Bienenweide, pflegeleicht  |   |
| Pflanzung / Pflege | 60-80cm , 3 St./m <sup>2</sup> ; Rückschnitt der Stängel im Herbst, Abdeckung im Winter |  |   |

### 10.3. Wartungsplan des Gründachs

| Arbeitsbereich             | Aufgabe   | Häufigkeit                                   | Verantwortlichkeit                                |
|----------------------------|---|--|---|
| <b>Anlage allgemein</b>    | Überprüfung und ggf. Reinigung der Regenrinnen und Freihalten der Fallrohrsiebe   | Bei jeder Begehung, mind. aber alle 2 Wochen | Alle  |
|                            | Allgemeine Überprüfung des Gründachs auf Ordnung und Schäden (z.B. Stromkästen geschlossen, Arbeitsgeräte weggeräumt)               | Bei jeder Begehung                           | Alle  |
|                            | Rasenmähen um die Klimastation und um das Gründach  | Monatlich                                    | Botanischer Garten                                |
| <b>Pflanzen</b>            | Bonitur   | Alle 2 Wochen in der Vegetationsperiode      | Landschaftsarchitektur                            |
|                            | Unkrautentfernung Nebenflächen  | Monatlich in der Wachstumsperiode            | Landschaftsarchitektur                            |
|                            | Drohnenbefliegung   | Alle 2 Wochen                                | Landschaftsarchitektur                            |
| <b>Messsystem</b>          | Überprüfung des Auslaufschlitzes der Ablaufbehälter   | Monatlich                                    | Siedlungswasserwirtschaft                         |
|                            | Ablassen und Reinigung der Ablaufbehälter   | 2 x jährlich                                 | Siedlungswasserwirtschaft                         |
|                            | Überprüfung des Niederschlagsmessers auf Verstopfung  | Bei jeder Begehung, mind. aber alle 2 Wochen | Siedlungswasserwirtschaft                         |
|                            | Überprüfung und Säuberung der HydraProbe-Sensoren von Organik und oberflächlichem Rost  | 1 x jährlich                                 | Siedlungswasserwirtschaft                         |
|                            | Überprüfung der Messsensoren auf Ausfälle und der Ventile auf Dichtigkeit (→ Alarmierung per SMS oder Mail wird zeitnah hinterlegt) | mind. 2 x wöchentlich                        | Siedlungswasserwirtschaft, Meteorologie           |
|                            | Reinigung der Go-Sonden mit schwacher Säure   | 2 x jährlich                                 | Siedlungswasserwirtschaft                         |
| <b>Bewässerungssystem</b>  | Spülung des Bewässerungssystems bei Verschmutzung   | Bei Bedarf (Ventile undicht)                 | Siedlungswasserwirtschaft, Landschaftsarchitektur |
|                            | Ablassen des Bewässerungssystems für die Winterruhe (Frostschutz!)  | 1 x jährlich im November oder Dezember       | Siedlungswasserwirtschaft, Landschaftsarchitektur |
|                            | Wiederinbetriebnahme der Bewässerung für Vegetationsperiode   | 1 x jährlich im März oder April              | Siedlungswasserwirtschaft, Landschaftsarchitektur |
| <b>Pflanzenklär-anlage</b> | Ablassen der PKA für die Winterruhe   | 1 x jährlich im November oder Dezember       | Siedlungswasserwirtschaft                         |
|                            | Wiederinbetriebnahme der PKA für die Vegetationsperiode   | 1x jährlich im März oder April               | Siedlungswasserwirtschaft                         |
|                            | Entfernung von Unkraut auf der Pflanzenkläranlage   | Bei Bedarf                                   | Siedlungswasserwirtschaft                         |

# 10.4. Vergrößerte Darstellung Abbildung 2.3-1 Messschema

