Technische Universität Dresden

Modellprojekt Integrales Wassermanagement – Varianz und Validierung

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

Abschlussbericht

über das unter dem AZ: 38658/01
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
geförderte Forschungsprojekt

von

Professur für Landschaftsbau
Professur für Siedlungswasserwirtschaft
Professur für Bauphysik
Professur für Meteorologie
Junior-Professur für Geosensorsysteme

Dresden, 14. August 2025

Impressum

Koordination, Projektmanagement, Öffentlichkeitsarbeit (Arbeitspaket 1):
Professur für Landschaftsbau
Professurinhaberin: Prof. Dipl.-Ing. Irene Lohaus
Autorin: Luisa Fraaß M.Sc.

Bonitur, Monitoring, Pflege der Dachbegrünung (Arbeitspaket 2):
Professur für Landschaftsbau
Professurinhaberin: Prof. Dipl.-Ing. Irene Lohaus
Autorin: Luisa Fraaß M.Sc.

Automatisierung der Vegetationsaufnahme (Arbeitspaket 3):
Junior-Professur für Geosensorsysteme
Professurinhaberin: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Anette Eltner
Autor: Oliver Grothum M.Sc.

Wasserbilanz, Stoffbilanz und Abflussprozesse (Arbeitspaket 4)
Professur für Siedlungswasserwirtschaft
Professurinhaber: Prof. Dr. Peter Krebs
Autor: Dipl.-Ing., Dipl.-Hydrol. Björn Helm

Bauklimatische Untersuchung des Kühlpotenzials (Arbeitspaket 5):
Professur für Bauklimatik
Professurinhaber & Autor: Prof. Dr. Ing. John Grunewald

Mikroklimatische Wirkung (Arbeitspaket 6):
Professur für Meteorologie
Professurinhaber: Prof. Dr. Matthias Mauder
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.

14. August 2025

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

06/02

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az 38658/01	**Referat** 167	**Fördersumme**	107.830,00 €
Antragstitel	Modellprojekt Integrales Wassermanagement – Varianz und Validierung Untersuchungen zur Optimierung der Effekte Einfacher Intensivdachbegrünung auf Gebäude- und Stadtklima, Wasserhaushalt und Vegetationsvielfalt im urbanen Umfeld durch Bewässerung mit Grauwasser		
Stichworte	Klimaschutz, Ressourcenschonung, Umweltforschung, Umwelttechnik		
Laufzeit 12 Monate (+ 8 Monate Verlängerung)	**Projektbeginn** 01.04.2023	**Projektende** 31.11.2024	**Projektphase(n)**
Zwischenberichte	-		
Bewilligungs-empfänger	Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Institut Landschaftsarchitektur, Professur für Landschaftsbau, Prof. Irene Lohaus Professur für Siedlungswasserwirtschaft, TU Dresden Professur für Meteorologie, TU Dresden Professur für Bauklimatik, TU Dresden Junior-Professur für Geosensorsysteme, TU Dresden Botanischer Garten der TU Dresden	Tel +49 351463-34447 Projektleitung Prof. Irene Lohaus Bearbeiterin Luisa Fraaß	
Kooperationspartner	-		

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Dachbegrünungen und Grauwasserverwendung sind Aspekte der deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. 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 Retentionsvermögen 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.

Das vorliegende Forschungsprojekt untersucht daher unter realen Einbaubedingungen aufbauend auf dem vorangegangenen Forschungsprojekt „Modellprojekt Integrales Wassermanagement“ nunmehr zusätzlich zu der Bewässerung mit geklärtem Grauwasser, die Möglichkeiten und Herausforderungen einer Bewässerung mit lediglich filtriertem Grauwasser, welches ganzjährig in Gebäudekreisläufen zur Verfügung steht. Darüber hinaus sollen die bisher gewonnenen Erkenntnisse validiert und die Datenlage zur Systemlösung der einfachen Intensivbegrünung erweitert werden.

Das Projekt erforscht die komplexen Prozesse einfacher Intensivdachbegrünungen in einem interdisziplinären Team. Dabei werden die Auswirkungen bewässerter einfacher Intensivgründächer auf Wasserhaushalt, Bau- und Umgebungsklima sowie Vitalität der Pflanzung querschnittorientiert getestet und quantifizierbar. Der Untersuchungsansatz der Nutzung von lediglich filtriertem Grauwasser im Freiland und in einer realen Einbausituation ist dabei ein Alleinstellungsmerkmal.

Die Ergebnisse liefern Erkenntnisse zu pflanzen- und wassergefährdenden Stoffausträgen, zur nächtlichen Abkühlung der Umgebungsluft, zum bauklimatischen Kühlpotenzial sowie zur

Pflanzenvitalität von Gründächern mit einfacher Intensivbegrünung. Da eine kontinuierliche Überwachung und Quantifizierung des Deckungsgrads von Dachflächen entscheidend für die Beurteilung und Optimierung von Dachbegrünungssystemen sein kann, wurde zudem für die Vegetationsbestimmung ein Verfahren des maschinellen Lernens auf Basis dreidimensionaler Punktwolken eingesetzt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die 21 je 3,5 m² großen Forschungsflächen im Botanischen Garten der TU Dresden wurden bereits im Frühjahr 2020 hergestellt, mit einer Vielzahl an Sensoren ausgestattet und in 2023 z. T. ergänzend instrumentiert. Die Forschungsfelder wurden mit unterschiedlichen Grauwasserqualitäten (filtriertes oder geklärtes Grauwasser) und mit drei unterschiedlichen Bewässerungsregimen bewässert: Typ 1 wird mit einer maximalen Bodenfeuchte versorgt (2,4 L/m²/d bei täglicher Bewässerung), Typ 2 mit einer medialen Bodenfeuchte (1,2 L/m²/d, d. h. Bewässerung alle zwei Tage) und Typ 3 mit einer minimalen Bodenfeuchte (0,6 L/m²/d, d. h. Bewässerung alle 4 Tage). In den nachfolgend beschriebenen Arbeitspaketen (AP) werden die jeweiligen Arbeitsschritte und Methoden in Kürze dargestellt.

AP 2 Beurteilung der Pflanzenvitalität

Das Kapitel widmet sich den Auswirkungen unterschiedlicher Bewässerungsregime mit geklärtem und mechanisch filtriertem Grauwasser auf die Vitalität und Entwicklung von insgesamt 11 Dachbegrünungspflanzen. Ziel ist es, mögliche nachteilige Effekte der filtrierten Grauwasserbewässerung zu identifizieren und Hinweise für eine ausfallarme Bepflanzung zu gewinnen. Für die Bewertung der Vitalität wurden von März bis Dezember 2023 und 2024 alle zwei Wochen Bonituren durchgeführt. Anschließend sind die Parameter Wuchshöhe, Individuenzahl, Anzahl blühender Individuen sowie die Blattmenge, -größe und -gesundheit mittels deskriptiver und inferenzstatistischer Verfahren ausgewertet worden. Im Fokus standen dabei die Zusammenhänge zwischen Pflanzenvitalität und Bewässerungsmenge sowie Grauwasserqualität. Ergänzend wurden UAV-Befliegungen durchgeführt, um die Deckungsgrade eines jeden Felds zu bestimmen.

AP 3 Automatisierung der Vegetationsaufnahme

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Verfahren des maschinellen Lernens getestet und weiterentwickelt, dass eine automatisierte Klassifikation von Vegetation aus UAV-Aufnahmen erlaubt, um den Bedeckungsgrad von Dächern zu bestimmen. Zunächst erfolgten UAV-Befliegungen zu zwei verschiedenen Jahreszeiten, damit das variierende Erscheinungsbild von Vegetation beim Trainieren berücksichtigt werden konnte. Anschließend wurden photogrammetrisch 3D-Punktwolken berechnet, die neben der geometrischen Information verschiedene radiometrische Angaben enthalten. Diese Datengrundlage ist genutzt worden, um verschiedene geometrische Punktmerkmale (u.a. Punktdichte, Rauigkeit und Linearität) auf verschiedenen Beobachtungsskalen sowie radiometrische Merkmale (u.a. Vegetationsindizes) abzuleiten und für das Trainieren eines Klassifikators zu nutzen.

AP 4 Wasserbilanz, Stoffbilanz und Abflussprozesse

Ziel des Arbeitspakets war die Bewertung der Langzeiteffekte der Grauwasserbewässerung auf Wasser- und Stoffbilanzen. Dabei standen insbesondere Salze und Tenside als potenziell pflanzenschädigende Stoffe aber auch Nitrat und Phosphor und organische Substanzen als Stoffe mit wassergefährdendem Potential im Fokus. Die Ergebnisse der Untersuchungen validieren die langfristige Verwendbarkeit von Grauwasser und geben Rückschlüsse auf den Behandlungsbedarf des Grauwassers und des Ablaufwassers aus Dachbegrünungen. Die Untersuchungen von Wasser und

Stoffhaushalt erfolgte für die Bewässerungsperioden der Jahre 2021 bis 2024. In diesem Zeitraum waren alle Jahre um 1,1 bis 2,1 °C wärmer als die Klimanormalperiode 1991 bis 2020. Die Retentionswirkung der Dachbegrünungen wurde anhand der 15 intensivsten Regenereignisse im Zeitraum 2021 – 2023 ausgewertet. Dabei wurden Ereignisse mit den Dauerstufen 15 Minuten, eine Stunde und 4 Stunden betrachtet.

AP 5 Bauklimatische Untersuchungen des Kühlpotenzials

Im Arbeitspaket Bauklimatik wurden hygrothermische Simulationen (DELPHIN) eingesetzt, um das Kühlpotenzial des bewässerten Gründachs zu ermitteln. Grundlage der Modellierung des Kühlpotenzials war der reale Gründachaufbau im Botanischen Garten Dresden. Es wurden systematisch Varianten analysiert, um den Einfluss zentraler Parameter – wie Bewässerung, Dämmstoffdicke, Substrateigenschaften, Innenraumklima und Substratschichtdicke – auf das Kühlpotenzial zu quantifizieren.

AP 6 Stadtklimatische Bewertung

Zur Bewertung des nächtlichen Kühleffekts des Gründachs wurden in 2023 16 Temperatur-Feuchte-Logger auf dem Gründach und seiner nahen Umgebung in verschiedenen Höhen installiert. Anschließend wurden die Daten in bewölkte und klare Nächte gefiltert und in stündliche Mittelwerte zusammengefasst. Darüber hinaus wurden die Dauermessungen an der Klimastation des Gründachs und des IR-Sensors am Dienstgebäude in den Jahren 2023 und 2024 kontinuierlich fortgesetzt. Dies ermöglicht eine weiterführende Analyse des Einflusses von Witterung und Bewuchs auf die Verteilung der IR-Temperatur auf den bewässerten und unbewässerten Gründachbereichen. Mit Hilfe der Modellierungssoftware ENVI-met wurde die Wirkung unterschiedlicher Pflanzendichte im Bereich der bewässerten Gründachbereiche untersucht.

Ergebnisse und Diskussion

AP 2 Beurteilung der Pflanzenvitalität

Die Untersuchung zeigt, dass sowohl mechanisch filtriertes als auch geklärtes Grauwasser eine vitale Entwicklung der elf getesteten Arten fördert. Die Bewässerung mit filtriertem Grauwasser wirkte sich bei einzelnen Arten tendenziell wachstums- und vitalitätsfördernd aus. Bistorta amplexicaule und Hemerocallis citrina erreichten unter filtrierter Grauwasserbewässerung größere Wuchshöhen, Bistorta blühte zudem tendenziell früher. Auch Campanula punctata, Campanula rotundifolia und Knautia macedonica zeigten unter filtriertem Grauwasser, insbesondere im maximalen Regime, eine erhöhte Blütenanzahl. Aufgrund der besseren Regenwasserversorgung in 2023 und 2024 im Vergleich zu 2022 fielen die Unterschiede zwischen den Bewässerungsregimen insgesamt geringer aus. Signifikante Differenzen waren i. d. R. nur zwischen den minimalen und maximalen Regimen nachweisbar. Auf dem unbewässerten Referenzfeld stellten die Arten C. punctata, C. rotundifolia und Knautia macedonica ihr oberirdisches Wachstum in Trockenphasen teils vollständig ein. Das Einziehen konnte bereits durch Minimalbewässerung verhindert und die Blühaktivität weitestgehend erhalten werden. In Gruppe 1 und 3 erschwerten Verschattungen durch umliegende Gebäude und Gehölze die direkte Vergleichbarkeit der Forschungsfelder, da sie lokal stark unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen verursachten. Wie zu erwarten zeigten beschattete Flächen in den heißen Sommermonaten eine höhere Vitalität als besonnte Flächen, selbst bei minimaler Bewässerung. Auf den nicht bewässerten und mit trockenheitstoleranten Arten bepflanzen Nebenflächen fiel der Bestand nach dem sehr heißen Sommer 2022 zunächst sehr lückig aus, erholte sich aber in den

Jahren 2023 und 2024 aufgrund des vorteilhafteren Witterungsverlaufs. Eine vollständige Bedeckung wurde jedoch zu keinem Zeitpunkt erreicht.

AP 3 Automatisierung der Vegetationsaufnahme

Die Analyse der Bedeckungsgrade über drei Messzeitpunkte zeigt drei deutliche Entwicklungstypen: Gruppe 1 wies zu Beginn in 2023 eine hohe Vegetationsbedeckung auf, die im Verlauf infolge eines Schädlingsbefalls durch Dickmaulrüsslerlarven deutlich abnahm. Gruppe 2 zeigte über alle Zeitpunkte hinweg konstant hohe Bedeckungsgrade mit nur geringen Schwankungen, was auf eine stabile und gesunde Vegetationsentwicklung hindeutet. Gruppe 3 startete aufgrund einer Neupflanzung im Juli 2023 mit sehr niedrigen Werten, konnte jedoch über die Zeiträume hinweg einen kontinuierlichen und deutlichen Anstieg der Bedeckung verzeichnen. Zusätzlich wurde testweise die Pflanzenhöhe als Punktattribut berechnet. Für alle Versuchsflächen gelang dies technisch zuverlässig durch die Einpassung einer Bezugsebene und die Bestimmung vertikaler Punktabstände. Eine zusammenfassende Reduktion auf einen einzigen Höhenwert pro Fläche erwies sich jedoch als wenig aussagekräftig, da die Vegetation auf den Flächen sehr unterschiedlich ausgeprägt ist und einzelne Pflanzen sich individuell entwickeln. Die Drohnenbefliegung erwies sich als erfolgreich, zeigte jedoch Schwächen bei dünner Vegetation. Eine ergänzende Laserscanner- oder Nahbereichserfassung wird empfohlen.

AP 4 Wasserbilanz, Stoffbilanz und Abflussprozesse

Durch die Bewässerung erhöhte sich das Wasserdargebot im Mittel um 35 % durch die minimale Bewässerung, um 70 % durch die mediale und um 105 % durch die maximale Bewässerung. Die Retentionswirkung nimmt mit zunehmender Ereignisdauer und mit zunehmender Bewässerungsintensität ab. Die Wasserbilanz während der Bewässerungsperioden bestätigte für die unbewässerten Dachaufbauten mit Kies, extensiver und einfacher Intensivbegrünung die Vorgaben aus der DIN 1986-100. Durch die zusätzliche Bewässerung konnte die Verdunstungsleistung deutlich erhöht werden, gleichzeitig erhöht sich auch der Abfluss leicht. Für die Bewässerung wurden gereinigtes Grauwasser aus einer Pflanzenkläranlage und mechanisch filtriertes Grauwasser verglichen. Das filtrierte Grauwasser wies dabei deutlich höhere Gehalte an organischen Stoffen, Nährstoffen und Feinpartikeln auf. Diese Stoffe werden in der Dachbegrünung weitgehend zurückgehalten. Es kommt durch den Wasserrückhalt jedoch zu einer leichten Aufkonzentration von organischen Stoffen und Nährstoffen. Die Akkumulation von Salzen wurde auf Grundlage von Messreihen zur elektrischen Leitfähigkeit bewertet. Hier zeigen die Felder mit geklärter und mit filtrierter Bewässerung eine leicht höhere Leitfähigkeit als unbewässerte Vergleichsflächen. Die Werte nehmen aber im Untersuchungszeitraum ab, sodass auf dieser Grundlage keine Akkumulation zu befürchten ist.

AP 5 Bauklimatische Untersuchungen des Kühlpotenzials

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Bewässerung mit dem maximalen Regime ein jährliches Kühlpotenzial von ca. 2.1 kWh/m² erreicht. Weniger intensive Bewässerungsregime (minimal und medial) erzeugen kaum Unterschiede zur unbewässerten Variante, da der Einfluss von Niederschlag dominiert. Eine Reduzierung der Dämmstoffdicke erhöht das Kühlpotenzial deutlich (bis auf 6.3 kWh/m²), führt jedoch im Winter zu höheren Wärmeverlusten. Eine erhöhte Wasserspeicherfähigkeit des Substrats beeinflusst die Temperaturverläufe nur geringfügig und steigert das Kühlpotenzial nicht wesentlich. Auch die Variation des Innenraumklimas sowie der Substratschichtdicke zeigt, dass primär die Bewässerung entscheidend für das Kühlpotenzial ist.

AP 6 Stadtklimatische Bewertung

Die räumlich und zeitlich verdichtete Erfassung der Lufttemperatur und Luftfeuchte auf dem Gründach und dessen näherer Umgebung zeigt das Potential des Gründachs, die Temperatur zu senken.

Dabei ist die Kühlwirkung der bewässerten und dicht bewachsenen Forschungsfelder am Tage stärker, während spärlich bewachsene Abschnitte nachts besser abkühlen. Die Messdaten zeigten, dass das Gründach in klaren Sommernächten, insbesondere über unbewässerten, niedrig bewachsenen Flächen eine geringe, aber messbare nächtliche Abkühlung von bis zu 1 K aufweist. Eine signifikante Ausstrahlungswirkung in die Umgebung wurde aufgrund der geringen Ausdehnung des Gründachs nicht festgestellt. Am Tage wiesen bewässerte, beschattete Flächen die niedrigsten Oberflächentemperaturen auf. Auch bei gleicher Bewässerung führten Unterschiede in der Sonneneinstrahlung zu Differenzen von bis zu 10 K. Zeitweise beschattete Flächen, insbesondere in den Mittagstunden, beeinflussten demnach indirekt das Pflanzenwachstum positiv, da potenziell weniger Wasser verdunstet und somit mehr Feuchtigkeit für die Vegetation bereitgestellt wird.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden sowohl in der wissenschaftlichen Fachgemeinschaft als auch in der Umweltbildung und Lehre breit kommuniziert. Neben der Einbindung in das Berichtswesen und wissenschaftliche Publikationen erfolgte eine gezielte Aufbereitung für Vorträge und öffentlichkeitswirksame Präsentationen. Auf wissenschaftlicher Ebene wurde das Projekt auf nationalen und internationalen Konferenzen präsentiert u. a. auf dem IAHR Europe Congress in Lissabon (Portugal), der International Conference on Urban Drainage in Delft (Niederlande) oder auf der Fachtagung „Wassersensible Stadtentwicklung“ in Halle (Saale). Im Rahmen der Umweltbildung wurde das Gründach mehrfach in Fortbildungen und Exkursionen der Stadt Dresden eingebunden. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse für Weiterbildungen aufbereitet u. a. für die Weiterbildungskurse der DWA Sachsen/Thüringen zum Ressourcenmanager Regenwasser. Das Forschungsgründach ist zudem seit Herbst 2020 fester Bestandteil der Lehre in den Studiengängen der Landschaftsarchitektur und Siedlungswasserwirtschaft. Im Zuge des Projekts hatten verschiedene studentische (Abschluss-) Arbeiten das Forschungsgründach sowie die Auswertung der ermittelten Messdaten zum Gegenstand.

Fazit

Die Zusammenschau der Ergebnisse aus der zweijährigen Untersuchung zeigt das Potenzial eines ressourcenschonenden und praxistauglichen Ansatzes zur Grauwassernutzung. Der Verzicht auf eine Pflanzenkläranlage erhöht dabei nicht nur die Übertragbarkeit des Systems auf innerstädtische Flächen mit begrenztem Raumangebot, sondern reduziert zugleich technische Komplexität, Kosten und Wasserverluste durch Verdunstung.

AP 2 Beurteilung der Pflanzenvitalität

Sowohl mechanisch filtriertes als auch geklärtes Grauwasser eignen sich grundsätzlich zur Bewässerung einfach-intensiver Dachbegrünungen. Bereits minimale Grauwassergaben (0,6 L/m²/d) reichten aus, um während Hitze- und Trockenperioden die Vitalität zu erhalten, die Blühaktivität weitestgehend zu sichern und das Einziehen oberirdischer Pflanzenteile zu verhindern. Die Bewässerung mit filtriertem Grauwasser zeigte im Vergleich zur geklärten Variante tendenziell vitalitätssteigernde und wachstumsfördernde Effekte, was auf die im Wasser verbliebenen Nährstoffe zurückgeführt werden kann. Die Erkenntnisse bieten eine fundierte Grundlage für weitere Forschungen zur pflanzen- und standortgerechten Planung sowie für die Etablierung von Grauwasserbewässerung als integralen Bestandteil zukunftsfähiger Dachbegrünungssysteme. Da sich beide

Grauwasserqualitäten (filtriert/geklärt) zur Erhaltung und Förderung der Pflanzenvitalität eigneten, erscheint der Verzicht auf eine platzintensive Pflanzenkläranlage für die untersuchten Arten plausibel.

AP 3 Automatisierung der Vegetationsaufnahme

Die Klassifikation trennte Vegetation zuverlässig, blieb aber abhängig von den Trainingsdaten. Deep-Learning-Ansätze wie PointNet++ könnten die Genauigkeit verbessern. Die automatisierte Bedeckungsgradberechnung ist umgesetzt, jedoch noch nicht vollständig automatisiert. Zukünftige Arbeiten sollten weitere Parameter wie das Pflanzenvolumen integrieren und manuelle Schritte weiter automatisieren.

AP 4 Wasserbilanz, Stoffbilanz und Abflussprozesse

Die Ergebnisse der Stoffanalysen des Dachablaufwassers zeigen, dass die Dachbegrünung – insbesondere bei Bewässerung mit filtriertem Grauwasser – selbst Reinigungsleistungen übernimmt. Da die Ablaufkonzentrationen der untersuchten Stoffe bei den mit Grauwasser bewässerten Flächen keine systematisch höheren Werte aufwiesen als jene der unbewässerten Referenzflächen, erscheint eine lokale Versickerung oder Einleitung des Ablaufwassers in die Regenwasserentwässerung grundsätzlich möglich und sinnvoll. Für eine zuverlässige Berücksichtigung der Retentionsleistung sollten spezifische Vorgaben erarbeitet werden. Bewässerte Dachbegrünungen können einen positiven Beitrag zu einer ausgeglichenen urbanen Wasserbilanz leisten.

AP 5 Bauklimatische Untersuchungen des Kühlpotenzials

Eine abschließende Verifikation mit stark erhöhten Verdunstungs- und Kapillarparametern zeigt nur minimale zusätzliche Kühleffekte. Daraus wird geschlossen, dass das Modell keine systematischen Unterschätzungen enthält und die ermittelten Kühlpotenziale realistisch sind. Insgesamt verdeutlicht die Untersuchung das vorhandene, aber begrenzte bauklimatische Kühlpotenzial bewässerter Gründächer.

AP 6 Stadtklimatische Bewertung

Die Untersuchungen verdeutlichen, dass kleinflächige Gründächer nur begrenzt zur nächtlichen Abkühlung beitragen können. Tagsüber waren kombinierte Effekte aus Bewässerung und gezielter Beschattung deutlich wirksamer. Simulation und Messdaten zeigen, dass insbesondere die zeitweise Verschattung zur Mittagszeit – in Verbindung mit ausreichender Bewässerung – die Temperaturverhältnisse auf dem Gründach optimiert, Verdunstungsverluste reduziert und damit das Pflanzenwachstum begünstigt. Da ein zeitlich zusammenfallender Vergleich von Messung und Simulation bislang nicht möglich war, sind weiterführende Untersuchungen auf größeren Dachflächen sowie mit synchronisierten Mess-Simulationsansätzen erforderlich.

Inhaltsverzeichnis

Impressum **2**
Projektkennblatt **3**
Inhaltsverzeichnis **9**
Abbildungsverzeichnis **11**
Tabellenverzeichnis **17**
Abkürzungsverzeichnis **19**
1. Anlass und Zielsetzung des Projektes **20**
1.1 Einführung 20
1.2 Zielsetzung 22
2. Ausgangssituation Forschungsgründach **24**
3. Öffentlichkeitsarbeit (Arbeitspaket 1) **27**
4. Beurteilung der Pflanzenvitalität der Dachbe-grünung (Arbeitspaket 2) **30**
4.1 Vorhaben und Zielstellung 30
4.2 Ausgangssituation 31
4.3 Ergebnisse 35
4.3.1 Klimatische Bedingungen in 2023 und 2024 35
4.3.2 Gruppe 1: Einfluss Wasserdargebot auf Vitalität bei geklärter Grauwasserbewässerung 38
4.3.3 Gruppe 2: Einfluss Wasserdargebot und Art des Grauwassers auf Vitalität 47
4.3.4 Gruppe 3: Einfluss Wasserdargebots und Art des Grauwassers auf Vitalität 64
4.3.5 Bewertung der unbewässerten Nebenflächen 94
4.3.6 Fazit 98
5. Automatisierung der Vegetationsaufnahme (Arbeits-paket 3) **101**
5.1 Ziele und Vorhaben 101
5.2 UAV-Befliegung 101
5.3 Generierung der digitalen Oberflächenmodelle 103
5.4 Punktwolkenprozessierung 104
5.5 Klassifizierung 105
5.6 Auswahl der Merkmale und Trainingsparameter 107
5.7 Auswertung 112
5.8 Fazit 114
5.9 Abschließender Methodikvergleich zur Ermittlung des Deckungsgrads 115
6. Wasserbilanz, Stoffbilanz und Abflussprozesse (Arbeitspaket 4) **120**
6.1 Einleitung 120
6.2 Wasserhaushalt 120
6.2.1 Hydroklimatische Randbedingungen und Bewässerung 120
6.2.2 Niederschlag-Abfluss-Prozesse 121

6.2.3 Wasserbilanz ... 123
6.3 Stoffhaushalt ... 124
6.3.1 Bewässerungswasser ... 125
6.3.2 Salzhaushalt in der Dachbegrünung ... 127
6.3.3 Stoffrückhalt in der Dachbegrünung ... 128
7. Bauklimatische Untersuchung des Kühlpotenzials (Arbeitspaket 5) ... 132
7.1 Einleitung ... 132
7.2 Voruntersuchungen ... 132
7.3 Ergebnisse ... 135
7.3.1 Modellergebnisse zu Temperatur-, Feuchte- und Wärmeströmen bei bedarfsgesteuerter Bewässerung ... 135
7.3.2 Variantenuntersuchungen auf Grundlage standortspezifischer Parameter ... 137
7.4 Verifikation ... 145
8. Stadtklimatische Bewertung (Arbeitspaket 6) ... 147
8.1 Temperaturmessungen auf dem Gründach ... 147
8.2 Dauermessungen am Gründach ... 149
8.2.1 Messungen an der Klimastation ... 150
8.2.2 Messung der Oberflächentemperatur des Gründachs ... 151
8.3 Modellierung mit ENVI-met ... 153
8.3.1 Modell-Setup ... 153
8.3.2 Wirkung von Bepflanzung und Gebäudeschatten auf die Temperatur, Modellergebnisse im Vergleich mit Messwerten ... 153
9. Querschnittsorientierte Diskussion der Ergebnisse und Fazit ... 157
9.1 Diskussion ... 157
9.2 Fazit ... 161
10. Literatur ... 164
11. Anhang ... 166
Anhang 1: Klimadiagramm Wetterstation Dresden-Strehlen 2022 ... 166
Anhang 2: Individuenzahlen der Brunnera der Gruppe 1 in 2024 ... 166
Anhang 3: Individuenzahlen von Lysimachia in 2024 (filtriert/geklärt) der Gruppe 2 ... 167
Anhang 4: Individuenzahlen von Brunnera in 2024 (filtriert/geklärt) der Gruppe 2 ... 167
Anhang 5: Blühende Individuen der Gruppe 2 in 2024 – Signifikanztests ... 168
Anhang 6: Wuchshöhe Gruppe 3 in 2023 und 2024 – Signifikanztests ... 168
Anhang 7: Gesamtindividuenzahlen Gruppe 3 in 2023 und 2024 ... 170
Anhang 8: Vergleichende Drohnenaufnahmen von MAX (geklärt) der Gruppe 3 2023/2024 ... 171
Anhang 9: Methodenvergleich Deckungsgraderfassung für die Gruppen 1 bis 3 zu drei verschiedenen Zeitpunkten ... 172

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Foto des Forschungsgründachs am 24.05.2023. 20
Abbildung 2: Übersicht Schwerpunktthemen und korrespondierende Arbeitspakete 22
Abbildung 3: Übersicht über die Forschungsfelder einschließlich der Bewässerungsregime; rot umrahmte Felder werden mit filtriertem Grauwasser und alle anderen (bis auf III-8) mit geklärtem Grauwasser bewässert. 25
Abbildung 4: Schema des Messaufbaus mit allen verbauten Sensoren 26
Abbildung 5: Vergleich der Ausgangsituation der Deckungsgrade der Gruppe 2 am 12.06.2023 vor Beginn der filtrierten Grauwasserbewässerung (Drohnenaufnahmen) 33
Abbildung 6: Vergleich der Ausgangsituation der Deckungsgrade der Gruppe 2 am 02.04.2024 vor Beginn der filtrierten Grauwasserbewässerung (Drohnenaufnahmen) 34
Abbildung 7: Vergleich der Ausgangsituation der Deckungsgrade der Gruppe 3 am 17.07.2023 vor Beginn der filtrierten Grauwasserbewässerung (Drohnenaufnahmen) 34
Abbildung 8: Vergleich der Ausgangsituation der Deckungsgrade der Gruppe 3 am 02.04.2024 vor Beginn der filtrierten Grauwasserbewässerung (Drohnenaufnahmen) 34
Abbildung 9: Monatliche Niederschlagssummen und Durchschnittstemperaturen in 2023 in Dresden-Strehlen 36
Abbildung 10: Monatliche Niederschlagssummen und Durchschnittstemperaturen in 2024 in Dresden-Strehlen 37
Abbildung 11: Schattenwurf auf die Gruppe 1: Schattendiagramm für Gruppe 1 aus 3D-Modell mit Sonnenverlauf für Dresden am 30. Juli um 9:00 (links), 12:00 (mittig) und 15:00 (rechts) 39
Abbildung 12: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten je Feld der Gruppe 1 bei geklärter Grauwasserbewässerung in 2023 40
Abbildung 13: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten je Feld der Gruppe 1 bei geklärter Grauwasserbewässerung in 2024 40
Abbildung 14: Summe aller Individuen je Feld der Gruppe 1 bei geklärter Grauwasserbewässerung in 2024 41
Abbildung 15: Summe blühender Individuen der Gruppe 1 im Jahr 2024; im 1. Halbjahr waren die Forschungsfelder von Dickmaulrüsslerlarven betroffen; fast vollständige Neupflanzungen erfolgten am 4. Juni 2024 42
Abbildung 16: Deckungsgrade der Gruppe 1 in 2023 (Graphische Auswertung der UAV-Aufnahmen) 42
Abbildung 17: Deckungsgrade der Gruppe 1 in 2024 (Graphische Auswertung der UAV-Aufnahmen); Neupflanzungen am 04. Juni 2024 43
Abbildung 18: Mittlere Blattmenge aller Arten je Feld der Gruppe 1 in 2023 45
Abbildung 19: Mittlere Blattgröße aller Arten je Feld der Gruppe 1 in 2023. 45
Abbildung 20: Blattgesundheit aller Arten je Feld der Gruppe 1 in 2023. 46
Abbildung 21: Schattenwurf auf die Gruppe 2: Schattendiagramm aus 3D-Modell mit Sonnenverlauf für Dresden am 30. Juli um 9:00 (unten links), 12:00 (unten mittig) und 18:00 (unten rechts). 48
Abbildung 22: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit filtrierter Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2023 (geglättete Werte mit Konfidenzintervall) 48
Abbildung 23: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit filtrierter Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2024 49

Abbildung 24: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit geklärter Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2024. 50
Abbildung 25: Vergleich der mittleren maximalen Wuchshöhe der filtrierten mit der geklärten Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2023 50
Abbildung 26: Vergleich des maximalen (blau), des medialen (grün) und des minimalen Regimes (orange) einschließlich der Konfidenzintervalle (Type = Konfidenzintervall) der Gruppe 2 in 2023. 51
Abbildung 27: Vergleich der mittleren maximalen Wuchshöhe der filtrierten mit der geklärten Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2024. 51
Abbildung 28: Veränderungen in der Individuenzahl seit Neupflanzung am 04. Juni (die darauffolgende Bonitur erfolgte am 07. Juni) bei der filtrierten und geklärten Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2024. 52
Abbildung 29: Exemplarischer Zeitvergleich des Felds II-7 (Maximalbewässerung mit geklärtem Grauwasser); Ausbreitung der Bistorta (rot umrandet) – rechts dominiert die wuchsstarke Bistorta das gesamte Forschungsfeld (Gruppe 2). 52
Abbildung 30: Individuenzahl von Geranium bei der filtrierten Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2024. 53
Abbildung 31: Individuenzahl von Geranium bei der geklärten Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2024. 53
Abbildung 32: Relative Häufigkeit blühender Individuen an dessen Gesamtzahl für das filtrierte Regime (gestrichelte Linien) sowie das geklärte Regime (durchgezogene Linien) für die Bewässerungsregime (Minimal, Medial, Maximal) der Gruppe 2 in 2024. 54
Abbildung 33: Absolute Häufigkeit der Frühblüher Brunnera und Bergenia der Gruppe 2 in 2024. 55
Abbildung 34: Absolute Häufigkeit der im Sommer blühenden Arten Lysimachia und Geranium der Gruppe 2 55
Abbildung 35: Absolute Häufigkeit der spät blühenden Art Bistorta der Gruppe 2. 56
Abbildung 36: Mittlere Deckungsgrade aller Arten der Gruppe 2 in 2023 bei geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung. 57
Abbildung 37: Mittlere Deckungsgrade aller Arten (geklärte und filtrierte Grauwasserbewässerung) der Gruppe 2 in 2024 (oben) sowie darunter einzeln die geklärte Bewässerung (links) und die filtrierte Bewässerung (rechts). 58
Abbildung 38: Mittlere Blattmenge aller Arten der Gruppe 2 in 2024. 60
Abbildung 39: Mittlere Blattmengen für die Arten Bistorta (links), Geranium (mittig) und Lysimachia (rechts) der Gruppe 2 in 2024. 61
Abbildung 40: Mittlere Blattgrößen aller Arten der Gruppe 2 in 2024. 62
Abbildung 41: Mittlere Blattgrößen der Bistorta der Gruppe 2 in 2024. 62
Abbildung 42: Mittlere Blattgesundheit aller Arten der Gruppe 2 in 2024. 63
Abbildung 43: Schattenwurf auf die Gruppe 3: Schattendiagramm aus 3D-Modell mit Sonnenverlauf für Dresden am 30. Juli um 9:00 (unten links), 12:00 (unten mittig) und 18:00 (unten rechts). 65
Abbildung 44: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit filtrierter Grauwasserbewässerung der Gruppe 3 in 2023 (geglättete Werte mit Konfidenzintervall) 66
Abbildung 45: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit filtrierter Grauwasserbewässerung der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte mit Konfidenzintervall) 67

Abbildung 46: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit geklärter Grauwasserbewässerung der Gruppe 3 in 2023 (geglättete Werte mit Konfidenzintervall) 68
Abbildung 47: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit geklärter Grauwasserbewässerung der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte mit Konfidenzintervall) 69
Abbildung 48: Mittlere maximale Wuchshöhe der Alchemilla mit geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung je nach Bewässerungsregime der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte) 69
Abbildung 49: Mittlere maximale Wuchshöhe der Campanula rotundifolia mit geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung je nach Bewässerungsregime der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte)....70
Abbildung 50: Mittlere maximale Wuchshöhe der Campanula punctata mit geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung je nach Bewässerungsregime der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte) 71
Abbildung 51: Mittlere maximale Wuchshöhe der Hemerocallis mit geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung je nach Bewässerungsregime der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte) 72
Abbildung 52: Mittlere maximale Wuchshöhe der Knautia mit geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung je nach Bewässerungsregime der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte) 73
Abbildung 53: Mittlere maximale Wuchshöhe der Molinia mit geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung je nach Bewässerungsregime der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte) 74
Abbildung 54: Anzahl der blühenden Alchemilla der Gruppe 3 in 2024....75
Abbildung 55: Anzahl der blühenden Campanula punctata der Gruppe 3 in 2024 76
Abbildung 56: Anzahl der blühenden Campanula rotundifolia der Gruppe 3 in 2024 77
Abbildung 57: Anzahl der blühenden Hemerocallis der Gruppe 3 in 2024....78
Abbildung 58: Anzahl der blühenden Knautia der Gruppe 3 in 2024 79
Abbildung 59: Mittlere Deckungsgrade aller Arten der Gruppe 3 in 2023 im Vergleich zur unbewässerten Referenzfläche sowie darunter die geklärte Bewässerung (links) und die filtrierte Bewässerung (rechts). 80
Abbildung 60: Exemplarischer Zeitvergleich des Felds III-2 (mediales Regime, geklärt) der Gruppe 3 bei Neupflanzung (obere Aufnahme vom 24.07.2023), zu Ende der ersten Vegetationsperiode (mittlere Aufnahme vom 04.10.2023) und im voll entwickelten Stadium in 2024 (untere Aufnahme vom 24.06.2024)....81
Abbildung 61: Mittlere Deckungsgrade aller Arten der Gruppe 3 in 2024 im Vergleich zur unbewässerten Referenzfläche sowie darunter die geklärte Bewässerung (links) und die filtrierte Bewässerung (rechts) 84
Abbildung 62: Mittlere Blattmenge aller Arten der Gruppe 3 in 2024. 87
Abbildung 63: Mittlere Blattgröße aller Arten der Gruppe 3 in 2024. 87
Abbildung 64: Mittlere Blattgesundheit aller Arten der Gruppe 3 in 2024....88
Abbildung 65: Blattmenge, -größe und -gesundheit der Alchemilla in der Gruppe 3 in 2024....89
Abbildung 66: Blattmenge, -größe und -gesundheit der Campanula punctata in der Gruppe 3 in 2024 90
Abbildung 67: Blattmenge, -größe und -gesundheit der Campanula rotundifolia in der Gruppe 3 in 2024 91

Abbildung 68: Blattmenge, -größe und -gesundheit der Hemerocallis in der Gruppe 3 in 2024 92
Abbildung 69: Blattmenge, -größe und -gesundheit der Knautia in der Gruppe 3 in 2024 93
Abbildung 70: Blattmenge, -größe und -gesundheit der Molinia in der Gruppe 3 in 2024 94
Abbildung 71: Bildvergleiche der Drohnenaufnahmen der unbewässerten Nebenflächen (Gesamtansichten in 2024 nur vom Frühjahr und Herbst vorhanden). 96
Abbildung 72: Beispielaufnahme mit ausgelegtem Passpunkt 103
Abbildung 73: RGB Punktwolken der jeweiligen Messepochen für Fläche FIII.3 104
Abbildung 74: Gelabelte Punktwolken als Vegetation (grün) und Nicht-Vegetation (braun). Rechts sind die gleichen Punktwolken als RGB dargestellt. 107
Abbildung 75: Konfusionsmatrix für die Klassifikatoren NDVI + geometrische Eigenschaften (links) und nur NDVI (rechts) 110
Abbildung 76: Feature Importance des Klassifikators mit NDVI und geometrischen Eigenschaften 111
Abbildung 77: Klassifikationsfehler des Klassifikators "NDVI" (oben) und "NDVI + geometrische Merkmale" (unten). Die Farbe Grün steht für die richtige Klassifikation, die Farbe braun steht für eine Fehlklassifikation. Zur optischen Einschätzung wurden die RGB Punktwolken jeweils darunter gelegt. 111
Abbildung 78: Vergleich der Differenzen zwischen der bildbasierten und der punktwolkenbasierten Deckungsgradbestimmung für die drei Gruppen auf dem Forschungsgründach. Die schwarzen Zahlen über den Boxplots geben die jeweiligen Medianwerte an. 116
Abbildung 79: Niederschlag- und Ablaufintensitäten der Messfelder I.1 (maximal bewässert = high), I.2 (medial bewässert = intermediate) und I.3 (minimal bewässert = low) für das Regenereignis am 23.08.2023. 122
Abbildung 80: Spannweiten, Interquartilsabstand und Mittelwerte der Spitzenabflussbeiwerte (oben, peak discharge coefficient) und Abflussbeiwerte (unten, runoff coefficient) für die Messfelder I.1 (maximal bewässert = high), I.2 (medial bewässert = intermediate) und I.3 (minimal bewässert = low) bei Regenereignissen mit 15 min, 1 h und 4 h Dauer. 123
Abbildung 81: Wasserbilanzkomponenten für die Bewässerungsperiode 2023 für Kiesdach, extensive, unbewässerte (ohne), minimal, medial und maximal bewässerte einfache Intensivdachbegrünung 124
Abbildung 82: Stoffkonzentrationen für chemischen Sauerstoffbedarf (CSB), gelösten organischen Kohlenstoff (DOC), Gesamtstickstoff (TN), Nitrat-Stickstoff (NO3.N), suspendierte Stoffe (TSS) und Gesamtphosphor (TP) im ungereinigten Abwasser (roh), filtrierten Grauwasser und gereinigten Grauwasser (PKA). 126
Abbildung 83: Verlauf der mittleren monatlichen Werte für elektrische Leitfähigkeit (electric conductivity, EC) im unbewässerten Kiesdach (gravel) und Extensivdach (ext) sowie in jeweils drei Replikaten (I-III) der minimal (low), medial (medium) und maximal (high) bewässerten einfachen Intensivbegrünungen. 127
Abbildung 84: Stoffkonzentrationen für chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) der Jahre 2023 (oben) und 2024 (unten) im filtrierten Grauwasser (filtriert), gereinigtem Grauwasser (PKA), sowie im Ablauf der mit filtriertem Grauwasser bewässerten Felder II.4 und III.3, mit gereinigtem Grauwasser bewässerten Felder II.7 und III.6 und dem Ablauf des unbewässerten Felds III.8. 128
Abbildung 85: Stoffkonzentrationen für Gesamtstickstoff (TN) der Jahre 2023 (oben) und 2024 (unten) im filtrierten Grauwasser (filtriert), gereinigtem Grauwasser (PKA), sowie im Ablauf der

mit filtriertem Grauwasser bewässerten Felder II.4 und III.3, mit gereinigtem Grauwasser bewässerten Felder II.7 und III.6 und dem Ablauf des unbewässerten Felds III.8 130
Abbildung 86: Konstruktion 132
Abbildung 87: Klimadaten am Standort 133
Abbildung 88: Innenklima 134
Abbildung 89: Temperatur- und Wassergehaltsfelder 135
Abbildung 90: Mittlere Wassergehalte in Substrat und Feuchtesensor 136
Abbildung 91: Wärmestromdichten 136
Abbildung 92: Wärmemengen über Innenoberfläche 137
Abbildung 93: Wassergehaltsfelder für das unbewässerte und das minimal bewässerte Forschungsfeld 138
Abbildung 94: Temperatur- und Wassergehaltsfeld für das maximal bewässerte Forschungsfeld 139
Abbildung 95: Wassergehalte der Forschungsfelder unter verschiedenen Bewässerungsregimen im Zeitverlauf 139
Abbildung 96: Wassergehalte in der Substratschicht über mehrere Jahre sowie die Wärmemengen über der Innenoberfläche der Forschungsfelder unter verschiedenen Bewässerungsregimen 140
Abbildung 97: Änderung der Konstruktionsmaße Dämmung 141
Abbildung 98: Einfluss der Dämmstoffdicke auf die Wärmemenge über der Innenoberfläche bei a) keiner Bewässerung und b) maximaler Bewässerung 141
Abbildung 99: Änderungen der Substrateigenschaften bei einem Sättigungsfeuchtegehalt von 40 Vol% und 50 Vol%. 142
Abbildung 100: Auswirkungen der Wasserspeicherfähigkeit auf die Wärmemenge über der Innenoberfläche sowie dem Wassergehalt in der Substratschicht 143
Abbildung 101: Auswirkungen der Bewässerungsmenge auf einen stark klimatisierten Innenraum gegenüber eines unklimatisierten Innenraums mit unbewässerter Dachbegrünung (Referenz) 144
Abbildung 102: Auswirkungen einer geringen Substratschichtdicke 145
Abbildung 103: Verifikation mittels einer Maximierung der Verdunstung (konvektiver Dampfübergang an der Oberfläche) und einer Maximierung der Wurzelwirkung (kapillarer Flüssigwassertransport im Substrat) 146
Abbildung 104: Schema des Gründachs mit den zusätzlichen Temperatursensoren (Lorz, 2023) 147
Abbildung 105: Messsensoren in den Höhen 50 cm und 85 cm über Grund am 12.07.23 (links) und am 12.09.23 (rechts) (Lorz, 2023) 147
Abbildung 106: Temperaturverteilung auf dem Gründach in klaren Sommernächten im Juli 2023 148
Abbildung 107: Wie Abb. 106, aber in bewölkten Sommernächten 149
Abbildung 108: Wie Abb. 106 für August 2023 149
Abbildung 109: Niederschlagssummen der DWD Stationen im Dresdner Elbtal, Juni-August 2023 und 2024 150
Abbildung 110: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur an der Klimastation Gründach in den Sommermonaten 2023 und 2024 150
Abbildung 111: Häufigkeitsverteilung der Globalstrahlung an der Klimastation Gründach in den Sommermonaten 2023 und 2024, Tagstunden 10-16 Uhr 151

Abbildung 112: Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperatur an der Klimastation Gründach vom 01.06.-15.08.2023, Tagstunden 10-16 Uhr 151
Abbildung 113: Häufigkeitsverteilung der mittleren Oberflächentemperatur an der Klimastation Gründach in den Sommermonaten 2024, Tagstunden 10-16 Uhr 152
Abbildung 114: Modellgebiet in ENVI-met mit dem Gründach (blaues Rechteck) und seiner Umgebung (3D Ansicht). 153
Abbildung 115: Schattenwurf (graue Fläche) des Dienstgebäudes im Botanischen Garten (schwarze Fläche), am Vormittag, Nachmittag und Abend des Simulationstages 16. Juli. 154
Abbildung 116: Modellgebiet in ENVI-met mit dem Gründach und seiner Umgebung (2D Ansicht). Die Rezeptorpunkte 1-6 sind auf den Feldern FI.1-6 platziert. 154
Abbildung 117: Tagesgang der solaren Einstrahlung an den Rezeptorpunkten FI.1-6 am simulierten wolkenlosen Sommertag 16. Juli. 155
Abbildung 118: Tagesgang der mittels IR Sensor gemessenen mittleren Oberflächentemperatur auf den Flächen FI.1-6 für einen mit der Modellsimulation vergleichbaren Sommertag (21.07.2024). 155
Abbildung 119: Tagesgang der Lufttemperatur in 0.5 m Höhe über dem Gründach. Differenz der Rezeptorpunkte FI.2-5 zu FI.1 am simulierten wolkenlosen Sommertag 16. Juli. 156

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Untersuchungsparameter der Bonituren.....30
Tabelle 2: Liste verwendeter Arten.....31
Tabelle 3: Skala Blattanzahl (links), Skala Blattgröße (mittig) und Skala Blattgesundheit (rechts) ..44
Tabelle 4: Exemplarischer Vergleich der Blattgesundheit der Felder mit Maximalbewässerung (Gruppe 1) am 18.09.2023 46
Tabelle 5: UAV-Aufnahmen inkl. Deckungsgrade der Felder mit filtrierter Grauwasserbewässerung zu zwei verschiedenen Zeitpunkten in 2024 (Gruppe 2) 58
Tabelle 6: UAV-Aufnahmen inkl. Deckungsgrade der Felder mit geklärter Grauwasserbewässerung in 2024 (Gruppe 2). 59
Tabelle 7: UAV-Aufnahmen inkl. Deckungsgrade der Felder des minimalen Regimes (Gruppe 2) in 2024. 59
Tabelle 8: Skala Blattanzahl (links), Skala Blattgröße (mittig) und Skala Blattgesundheit (rechts); analog zu Tabelle 3 für Gruppe 1.....60
Tabelle 9: Individuenzahlen ausgewählter Arten auf der unbewässerten Referenzfläche (Gruppe 3) 75
Tabelle 10: UAV-Aufnahmen inkl. Deckungsgrade der Felder mit geklärter Grauwasserbewässerung und filtrierter Grauwasserbewässerung im Gegensatz zur unbewässerten Referenzfläche am 04.10.2023 (Gruppe 3).....82
Tabelle 11: UAV-Aufnahmen inkl. Deckungsgrade der Felder mit geklärter Grauwasserbewässerung und filtrierter Grauwasserbewässerung im Gegensatz zur unbewässerten Referenzfläche am 05.08.2024 (Gruppe 3).....85
Tabelle 12: Skala Blattanzahl (links), Skala Blattgröße (mittig) und Skala Blattgesundheit (rechts); analog zu Tabelle 3 für Gruppe 1 und Tabelle 8 für Gruppe 2 86
Tabelle 13: Artenliste der Pflanzungen auf den Nebenflächen sowie Änderung der Individuenzahlen seit 2020 (orange: Abnahme, grün: Zunahme), Stand: Mai 2025. 97
Tabelle 14: Trainingsparameter und Kennwerte zum Training von drei verschiedenen Trainingseinstellungen. Die unteren drei Zeilen beziehen sich auf das Training nur mit NDVI, die anderen beiden Gruppen beziehen sich auf das Training mit NDVI und den geometrischen Eigenschaften. 109
Tabelle 15: Bedeckungsgrade der einzelnen Flächen..... 112
Tabelle 16: Bestimmung der summierten Vegetationsvolumen je Versuchsfläche in m³..... 113
Tabelle 17: Zeitpunkte der Drohnenaufnahmen der Professur für Landschaftsbau und der Junior-Professur für Geosensorsysteme für den Methodikvergleich der Deckungsgrad-Ermittlung... 115
Tabelle 18: Exemplarische Gegenüberstellung der Drohnenaufnahmen inklusive der bildbasierten und punktwolkenbasierten Bestimmung der Bedeckungsgrade der Flächen I-1 und I-4 vom November 2023..... 117
Tabelle 19: Meteorologische Kenngrößen der Monate Juni bis September und Bewässerungszeiträume in den Jahren 2021 – 2024 und im Vergleich zu den Klimanormalperioden 1961 – 1990 (KNP 61 – 90) und 1991 – 2020 (KNP 91 – 20) an der Klimastation Dresden-Strehlen..... 121
Tabelle 20: Spannweiten der Ereigniseigenschaften der 15 intensivsten Niederschlags-ereignisse für die Dauerstufen 15 Minuten, 1 Stunde und 4 Stunden im Zeitraum 2021 - 2023..... 122

Tabelle 21: Codierung der Variantenuntersuchung (gelblich markierte Felder zeigen die Referenzvariante) 137
Tabelle 22: Codierung der Varianten für die Variation der Bewässerung 138
Tabelle 23: Codierung der Varianten für die Variation der Dämmstoffdicke 140
Tabelle 24: Codierung der Varianten für die Variation der Wasserspeicherfähigkeit 142
Tabelle 25: Codierung der Varianten für die Variation der Innenraumklimatisierung 143
Tabelle 26: Codierung der Varianten für die Variation der Substratschichtdicke 144

Abkürzungsverzeichnis

BBA	Bündelblockausgleichung
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
DOC	gelöster organischer Kohlenstoff, Dissolved Organic Carbon
DOM	digitales Oberflächenmodell
EC	electric conductivity, dt.: elektrische Leitfähigkeit
GSD	Ground Sampling Distance
ICP	Iterative Closest Point
KNP	Klimanormalperiode
LF	Leitfähigkeit
MS-Punktwolke	Multispektral-Punktwolke
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NH4-N	Ammonium-Stickstoff
NIR	Near Infrared, dt.: Naher Infrarotbereich
NO3-N	Nitrat-Stickstoff
PKA	Pflanzenkläranlage
RTK	Real Time Kinematic (Positionsbestimmung mit GPS)
SfM	Structure from Motion (Strukturbestimmung aus Bewegungsdaten)
TN	Total Nitrogen, dt.: Gesamtstickstoff
TP	Total Phosphorus, dt.: Gesamtphosphor
TSS	Total Suspended Solids, dt.: suspendierte Stoffe
UAV	Unmanned Aerial Vehicle, dt.: Drohne
VIS	Visible Light, dt.: sichtbares Licht

1. Anlass und Zielsetzung des Projektes

1.1 Einführung

Dachbegrünungen und Grauwasserverwendung sind Aspekte der deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (Umweltbundesamt, 2023). 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 Retentionsvermögen 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. Das Forschungsprojekt hat daher aufbauend auf dem vorangegangenen Forschungsprojekt „Modellprojekt Integrales Wassermanagement“ nunmehr zusätzlich zu der Bewässerung mit aufbereitetem Grauwasser, die Möglichkeiten und Herausforderungen einer Bewässerung mit lediglich filtriertem Grauwasser, welches ganzjährig in Gebäudekreisläufen zur Verfügung steht, unter realen Einbaubedingungen untersucht und demonstriert. Darüber hinaus wurden die bisher gewonnenen Erkenntnisse validiert und die Datenlage zur Systemlösung der einfachen Intensivbegrünung erweitert.

Abbildung 1: Foto des Forschungsgründachs am 24.05.2023.

Die insgesamt 21 bereits vorhandenen Versuchsflächen sind zur Erfassung des Wasser-, Wärme und Stoffhaushalts im Dachaufbau z. T. ergänzend instrumentiert worden. Die Messungen der Klimastation zur Bereitstellung verdunstungsrelevanter Daten sowie auch Messungen der Strahlungstemperatur des Gründachs mittels Infrarotsensors wurden

kontinuierlich fortgeführt. Darauf aufbauend sind die Strahlungs- und Temperaturmessungen durch räumlich verdichtete mobile Sensoren auf und im Umfeld des Dachs erweitert worden, um den kleinskaligen Effekt der Bepflanzung auf den Verdunstungsantrieb sowie die mikroklimatische Fernwirkung des Gründachs auf die Umgebung zu bewerten.

Die Wasserqualität im Zulauf und Ablauf des Daches sowie im Substrat wurden regelmäßig sowie ereignisbezogen beprobt. Die Pflanzung ist mittels UAV-Aufnahmen (unpiloted aerial vehicle) in ihrem jahreszeitlichen Verlauf aufgenommen worden, um eine automatisierte Vegetationsklassifikation zu erhalten. Alle Teilaspekte konnten dabei an einem einzigen Versuchsdach im Botanischen Garten der TU Dresden untersucht werden. Die Einrichtung dieser Forschungsanlage wurde durch das Programm „Großgeräte der Länder“ der DFG finanziert.

Das Projekt erforscht die komplexen Prozesse einfacher Intensivdachbegrünungen in einem interdisziplinären Team. Die Auswirkungen bewässerter einfacher Intensivgründächer auf Bausubstanz und -klima, Wasserhaushalt, Umgebungsklima sowie Vitalität der Pflanzung wurden querschnittorientiert getestet und quantifiziert. Der Untersuchungsansatz der Nutzung von unfiltriertem Grauwasser im Freiland und in einer realen Einbausituation ist dabei ein Alleinstellungsmerkmal. Die Ergebnisse geben Auskunft über die Auswirkungen von der Grauwasserbewässerung auf die Stoffausträge mit Fokus auf potenziell pflanzenschädigende und wassergefährdende Stoffe, auf die lokale nächtliche Abkühlung der Umgebungsluft, das bauklimatische Kühlpotenzial sowie die Pflanzenvitalität von Gründächern mit einfacher Intensivbegrünung. Da eine kontinuierliche Überwachung und Quantifizierung des Deckungsgrads von Dachflächen entscheidend für die Beurteilung und Optimierung von Dachbegrünungssystemen sein kann, wurde zudem für die Vegetationsbestimmung ein Verfahren des maschinellen Lernens auf Basis dreidimensionaler Punktwolken eingesetzt.

Als Beitrag zum didaktischen Ansatz der forschenden Lehre werden begleitend zum Forschungsprojekt Abschlussarbeiten und Studienprojekte durchgeführt. Darüber hinaus wird das Forschungsdach in die Öffentlichkeitsarbeit des Botanischen Gartens und der Universität einbezogen.

Abbildung 2: Übersicht Schwerpunktthemen und korrespondierende Arbeitspakete

1.2 Zielsetzung

Ziel des Projektes ist zu untersuchen, ob sich die im vorangegangen Forschungsprojekt „Modellprojekt Integrales Wassermanagement“ nachgewiesenen Effekte für eine einfache Intensivbegrünung in einer typischen, gebauten Dachbegrünungssituation unter realen klimatischen Bedingungen durch eine Bewässerung mit geklärtem und auch mit lediglich filtriertem (d. h. ungeklärtem) Grauwasser verstetigen und validieren lassen. Hierfür wurden die vorhandenen Forschungsfelder der einfach-intensiven Dachbegrünung unter unterschiedlichen Bewässerungsregimen untersucht. Mit dem Einsatz von nicht behandeltem Grauwasser wurde darüber hinaus untersucht, ob Stoffkumulationen durch die Bewässerung mit Grauwasser festzustellen sind. Mit den Versuchen soll eine eigene Datengrundlage aufgebaut und bereits vorhandene, unter Laborbedingungen gewonnenen Forschungsergebnisse validiert und ergänzt werden.

Folgende Fragestellungen werden im Projekt betrachtet:

- Wie wirkt sich die Qualität des zur Bewässerung eingesetzten Grauwassers (geklärt vs. mechanisch filtriert) unter verschiedenen Bewässerungsregimen (minimal, medial, maximal) auf die Vitalität der Pflanzen aus?
- Welche Effekte hat die Bewässerung mit filtriertem und geklärtem Grauwasser auf die Wasser- und Stoffbilanzen von Dachbegrünungen, insbesondere in Bezug auf pflanzenschädigende Substanzen sowie wassergefährdende Stoffe?
- Kann das Kühlpotential und die mikroklimatische Fernwirkung (d. h. Abkühlung der Umgebung) eines unterschiedlich bewirtschafteten Gründachs durch eine spezielle Anordnung von Temperatur- und Feuchtesensoren messtechnisch bestimmt werden?
- Wie kann eine automatisierte und flexible Quantifizierung des Deckungsgrades der Dachflächen erfolgen, um eine Einschätzung der Dachbegrünungssituation zu unterstützen?

2. Ausgangssituation Forschungsgründach

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde das im Jahr 2019 eingerichtete Forschungsdach mit den umfassenden, durch ein DFG-Projekt finanzierten Messeinrichtungen vollständig weitergenutzt.

Die Forschungsflächen befinden sich innerhalb des Botanischen Gartens der TU Dresden. Angrenzend an das Verwaltungsgebäude steht eine ca. 240 m² große Dachfläche zur Verfügung, auf welcher eine einfache Intensivbegrünung mit 24 cm starkem Gesamtaufbau, bestehend aus einer Festkörperdrainage in 4 cm Stärke mit Filtervliesüberdeckung und einer 20 cm starken Substratschicht, realisiert wurde. Das Dach wurde entsprechend einer geplanten Begrünung als Warmdach ausgebildet, weist ein 2 %-Gefälle auf und befindet sich 1,3 m über dem Geländeniveau. Die sehr gute Einsehbarkeit lässt die parallele Nutzung als Forschungseinrichtung, für Lehrzwecke und zur Umweltbildung für Besucher des Botanischen Gartens zu. Eine öffentlichkeitswirksame Präsentation der Versuchsfläche und die parallele Nutzung für eine forschungsorientierte Lehre in mehreren Studiengängen hat sich bereits bewährt.

Eine Grauwasserausleitung aus dem Verwaltungsgebäude ist vorhanden. Das Grauwasser aus den Wasch- und Duschräumen der Mitarbeiter/innen des Botanischen Gartens wird zur Bewässerung genutzt. Die vorhandenen und vollumfänglich eingerichteten Untersuchungseinrichtungen (Dachfelder und Messsystem) wurden zur Optimierung der Messungen leicht modifiziert. In der vorhandenen 240 m² großen Dachbegrünung sind 21 Untersuchungsfelder á 3,5 m² integriert, welche baulich sowohl voneinander als auch von den Nebenflächen der Dachbegrünung abgetrennt sind. Die Felder sind bautechnisch so abgedichtet, dass sich eine Kommunikation der Substrate der Felder ausschließen lässt. Jedes Feld ist als einfache Intensivdachbegrünung aufgebaut ist mit verschiedenen kontinuierlich messenden Sensoren ausgestattet.

Die in drei Gruppen unterteilten Forschungsfelder (siehe Abb. 3) sind in eine vollständig begrünte Dachfläche integriert, die als einfache intensive Dachbegrünung ohne Zusatzbewässerung ausgestaltet ist. Dadurch kann ein für eine Dachfläche typisches Bestandsklima für die Vegetation generiert werden. Die Forschungsfelder der Gruppen 1 und 2 sind identisch, mit jeweils 5 Arten als Mischpflanzung bepflanzt. Die Gruppe 3 wurde im Rahmen des aktuellen Projekts vollständig neu mit sechs Arten als Mischpflanzung angelegt. Als Referenzflächen dienen eine Sedumfläche (Extensivbegrünung mit 10 cm Substratschicht) in Gruppe 1, eine Kiesfläche in Gruppe 2 sowie eine unbewässertes bepflanztes Forschungsfeld in Gruppe 3.

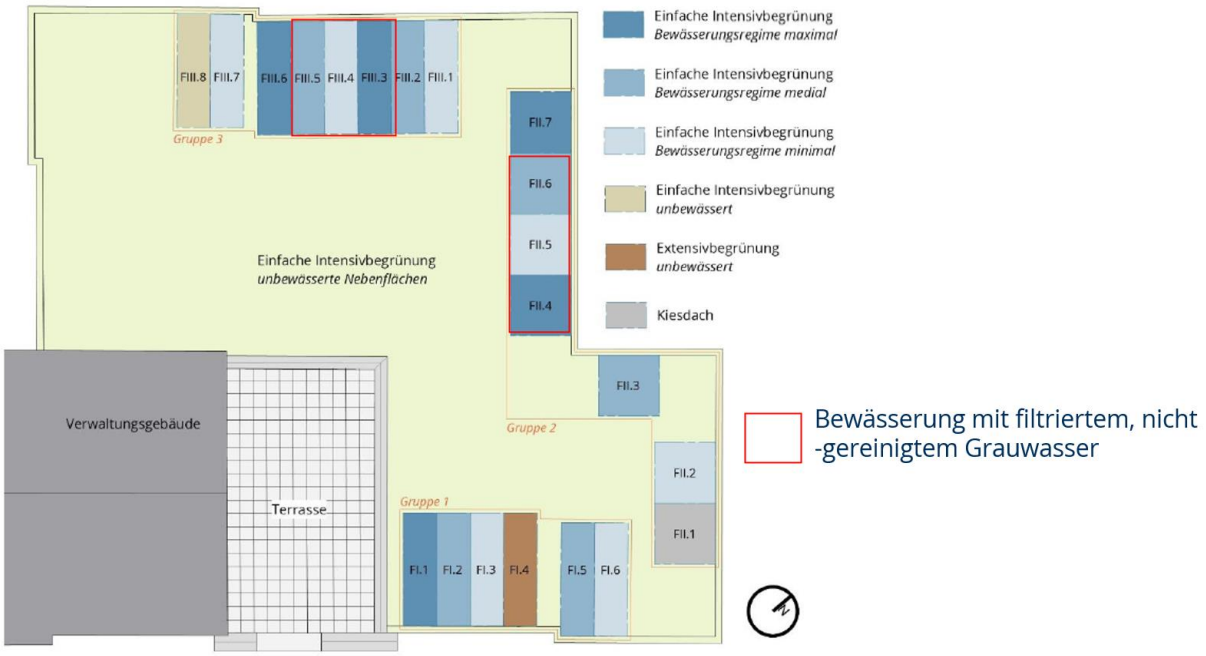


Abbildung 3: Übersicht über die Forschungsfelder einschließlich der Bewässerungsregime; rot umrahmte Felder werden mit filtriertem Grauwasser und alle anderen (bis auf III-8) mit geklärtem Grauwasser bewässert.

Die Zusammenstellung der Arten und deren Anordnung sind für jedes bepflanzte Feld so ausgewählt, dass jedes Bewässerungsregime grundsätzlich als für die Arten verträglich einzustufen ist und somit für keines der Regime ein Vorteil geschaffen wird. Die Flächen außerhalb der Forschungsfelder sind mit einer Mischpflanzung aus insgesamt 46 trockenheitsliebenden Arten versehen (siehe Forschungsbericht für das Untersuchungsjahr 2022 in Lohaus et al. (2023)).

Die Forschungsfelder sind mit drei unterschiedlichen Bewässerungsregimen bewässert worden: Typ 1 wird mit einer maximalen Bodenfeuchte versorgt (Maximalbewässerung, 2,4 L/m²/d bei täglicher Bewässerung), Typ 2 mit einer medialen Bodenfeuchte (Medialbewässerung, 1,2 L/m²/d mit Bewässerung alle zwei Tage) und Typ 3 mit einer minimalen Bodenfeuchte (Minimalbewässerung, 0,6 L/m²/d mit Bewässerung alle 4 Tage). Im vorliegenden Projekt wurden im Gegensatz zum vorherigen Projekt insgesamt 6 Felder mit filtriertem (anstatt geklärtem) Grauwasser bewässert.

Abgeleitet aus den vorliegenden Ergebnissen der Jahre 2020 bis 2022 (Lohaus et al., 2023) wurde gezielt das Messspektrum erweitert. Details zu den Untersuchungen und Messungen sind in den folgenden Arbeitspaketen dargestellt. Im Rahmen des vorangegangenen Vorhabens wurden die Forschungsfelder wie folgt mit Bewässerungs- und Messeinrichtungen versehen (Abb. 4):

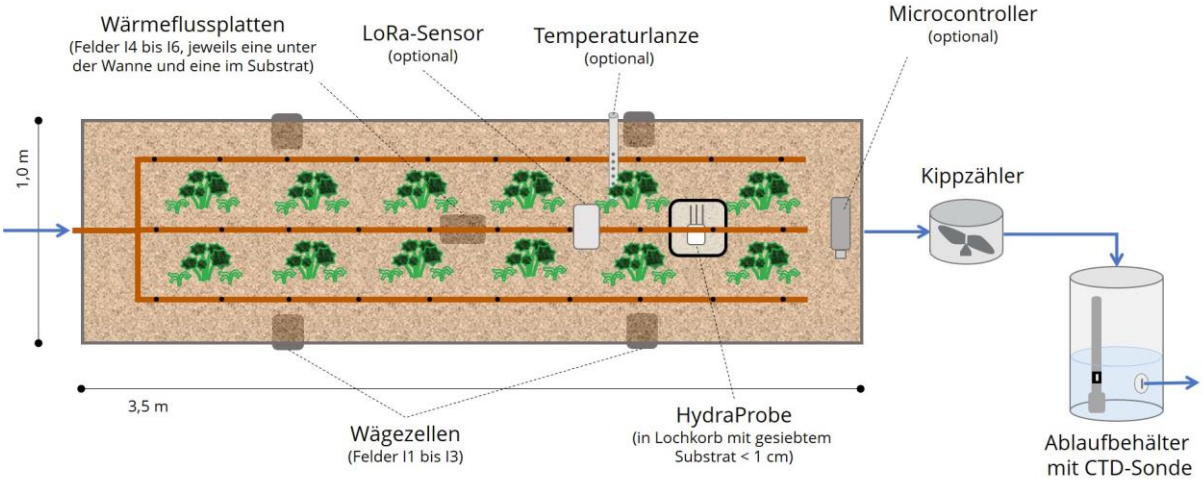


Abbildung 4: Schema des Messaufbaus mit allen verbauten Sensoren

3. Öffentlichkeitsarbeit (Arbeitspaket 1)

Die Ergebnisse des Vorhabens werden sowohl in der wissenschaftlichen Fachgemeinschaft als auch in der Umweltbildung und Lehre breit kommuniziert. Neben der Einbindung in das Berichtswesen und wissenschaftliche Publikationen erfolgt eine gezielte Aufbereitung für Vorträge und öffentlichkeitswirksame Präsentationen.

Darüber hinaus wird eine umfassende öffentliche Kommunikation angestrebt, die neben der Wissenschaft auch die allgemeine Öffentlichkeit adressiert. Dies beinhaltet unter anderem die Beratung der Stadt Dresden hinsichtlich Gebäudebegrünungen im Allgemeinen, der Mitwirkung von Fortbildungen für die Mitarbeitenden der Stadt Dresden sowie auch Vor-Ort Besichtigungen und Führungen des Gründachs bspw. für die Mitarbeitenden des Umweltamts. Ziel dieser Maßnahmen ist es, die Akzeptanz von Dachbegrünungen zu fördern, auf die Potenziale einfacher Intensivbegrünungen hinzuweisen und die Sensibilität für integrale Wassermanagementsysteme unter Einbeziehung des häuslichen Grauwassers zu erhöhen.

Im Folgenden erfolgt eine Auflistung der Publikationen, Fachvorträge, Lehrveranstaltungen und Studienarbeiten im Zeitraum 2023 bis 2025.

Fachvorträge

- Vortrag "Little catchments on the rooftop - effects of irrigation on water, matter and heat fluxes in green roofs" IAHR Europe Congress, Lissabon PT (06.06.2024)
- Vortrag "Benefits of grey water irrigated green roofs in urban environments - application potentials and simulation framework" International Conference on Urban Drainage, Delft NL (12.06.2024)
- Vortrag "Potentiale für die Grauwasserwiederverwendung in grüner Infrastruktur" Fachtagung „Wassersensible Stadtentwicklung“ Kompetenzzentrum Wasserwirtschaft Halle (Saale) (24.10.2024)
- Vortrag „Water balance simulation and storage tank size optimization of irrigated green roofs.” Urban Drainage Modelling Conference, Innsbruck AUT (18.09.2025)

Wissenschaftliche Publikationen und Fachartikel

Die Ergebnisse wurden in folgenden Fachzeitschriften veröffentlicht:

- Freudenberg, P., Goldberg, V., Helm, B. & Lohaus, I. (2024): "Grauwassernutzung für Intensivdachbegrünung: Optimierung der Effekte einfacher Intensivdachbegrünung durch Bewässerung mit Grauwasser als Beitrag zur Klimaanpassung." In RaumPlanung: Fachzeitschrift für räumliche Planung und Forschung, 5-2024, 228.

Integration in die Lehre und Fortbildungen

Die Thematik wird in verschiedenen Lehrformaten behandelt und für Weiterbildungen genutzt:

- Vor-Ort Besichtigung inkl. Projektvorstellung des Forschungsgründachs und Lehrveranstaltungen zum Thema Planung & Ausführung von Gründächern für die Studierenden des Bachelor-Studiengangs Landschaftsarchitektur (TU Dresden)
- Fortbildungsveranstaltungen für die Stadt Dresden zum Thema Gebäudegrün (im April 2024 sowie in Planung für Mai 2025)
- Exkursion des Umweltamts Dresden (Dezember 2024)
- Weiterbildung „Messkonzepte für Wasserhaushalt und Gewässerbelastung“ Weiterbildungskurs Ressourcenmanager Regenwasser, DWA Sachsen/Thüringen, Dresden (22.08.2024)
- Weiterbildung „Projektbeispiele blau-grüne Regenwasserbewirtschaftung“ Weiterbildungskurs Ressourcenmanager Regenwasser, DWA Sachsen/Thüringen, Dresden (03.09.2024)
- Weiterbildung "Wiederverwendung von Grauwasser für grüne Infrastruktur" DWA Sachsen/Thüringen, Dresden (06.09.2024)
- Workshop "Wasser erhalten - Schritte auf dem Weg zur "Schwamm-Gemeinde" Ökumenischer Energietag, Ökumenisches Informationszentrum Dresden (26.10.2024)
- Webinar "Von Regenrinnen, Klospülung und Zisternen Wie wird man Schwamm-Gemeinde?" Weiterbildungsreihe Zukunft einkaufen, Ökumenisches Informationszentrum Dresden (19.03.2025)
- Weiterbildung „Messkonzepte für Wasserhaushalt und Gewässerbelastung“ Weiterbildungskurs Ressourcenmanager Regenwasser, DWA Sachsen/Thüringen, Dresden (13.08.2025)
- Weiterbildung „Wasserbilanzen für Gründächer und Regenwasseranlagen“ Praxismodul Ressourcenmanager Regenwasser, DWA Sachsen/Thüringen, online (09.09.2025)
- Weiterbildung „Projektbeispiele blau-grüne Regenwasserbewirtschaftung“ Weiterbildungskurs Ressourcenmanager Regenwasser, DWA Sachsen/Thüringen, Dresden (16.09.2025)

Studien- und Projektarbeiten

Im Rahmen des Projekts wurden zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt:

Professur für Meteorologie:

- Masterarbeit (2023): Julio Vallejo – Cooling potential of green roofs as a function of their distribution and structure in typical European urban structures
- Meteorologisches Vertiefungspraktikum (2023): Franziska Lorz – Temperaturverteilung auf einem Gründach mit unterschiedlichem Bewuchs
- Naturressourcenprojekt (2023): Strahlungsklima einer Gründachbepflanzung
- Hydrologisch-meteorologisches Feldpraktikum (2023): Untersuchung der thermischen Belastung im Botanischen Garten Dresden

- Bachelorarbeit (2024): Hendrik Schenkel – Abschätzung des Kühleffekts von Dachbegrünung auf Photovoltaik-Module auf Basis von Modellsimulationen mit ENVI-met

Professur für Siedlungswasserwirtschaft:

- Masterarbeit (2024): Lebenszyklusanalyse von Gründächern, u. a. Untersuchung des Forschungsgründaches

4. Beurteilung der Pflanzenvitalität der Dachbegrünung (Arbeitspaket 2)

4.1 Vorhaben und Zielstellung

Das vorliegende Kapitel widmet sich den Auswirkungen unterschiedlicher Bewässerungsregime sowie Grauwasserqualitäten auf die Vitalität der Pflanzung. Dafür sind ab Juni 2023 erstmals neben mit geklärtem Grauwasser ausgewählte Forschungsfelder mit filtriertem (das bedeutet mit ungeklärtem und lediglich mechanisch gefiltertem) Grauwasser bewässert worden. Ziel war es dabei zu prüfen, ob die sehr viel weniger aufwändige und mit geringeren Wasserverlusten verbundene Filtration nachteilige Effekte auf die durch Bonituren erfassten Pflanzenmerkmale aufweist. Durch die Bonitur der Forschungsfelder wird der Verwendungswert der gewählten Arten für eine mit Grauwasser bewässerte einfach intensive Dachbegrünung eingeschätzt. Daraus sollen in der Zusammenschau der beurteilten Kriterien Hinweise für eine möglichst ausfallarme Dachbegrünung erstellt werden. Durch die Analyse der Pflanzenvitalität unter variierenden Bewässerungsregimen und Grauwasserqualitäten lassen sich insbesondere unter Berücksichtigung des Wasserhaushalts (Arbeitspaket 4, Kapitel 6), der bauklimatischen Bewertung (Arbeitspaket 5, Kapitel 7) sowie der stadtklimatischen Auswirkungen (Arbeitspaket 6, Kapitel 8) fundierte Rückschlüsse auf die Wechselwirkungen dieser Aspekte ziehen und die im vorausgegangenen Forschungsprojekt gesammelten Ergebnisse validieren. Die Bonituren erfolgten in einem zweiwöchigen Rhythmus von März bis Dezember sowohl in 2023 als auch in 2024 und umfassen diverse Parameter (Tabelle 1). Die erhobenen und digitalisierten Boniturdaten werden mit der Statistiksoftware R Studio mittels deskriptiver und inferenzstatistischer Verfahren ausgewertet. Bestimmte Zusammenhänge stehen bei der Auswertung im Fokus, so zum Beispiel der Zusammenhang zwischen Bewässerungsgabe und Vitalität. Dabei werden die Regime an einem Standort auf signifikante Unterschiede hin untersucht. Zusätzlich sind UAV-Fernerkundungsdaten (Drohnenaufnahmen) in die Auswertung miteingeflossen. Mit Hilfe dieser Aufnahmen werden die Deckungsgrade mittels fotografischer Auswertung manuell per Photoshop bestimmt.

Tabelle 1: Untersuchungsparameter der Bonituren

Parameter
Individuenzahl
Deckungsgrad (fotografische Auswertung)
Höhenentwicklung
Blühende Individuenzahl
Blattanzahl
Blattgröße
Blattgesundheit

4.2 Ausgangssituation

Die Gruppe 1 und 2 weisen seit Aufbau des Gründaches in 2020 die gleiche Artenzusammensetzung auf. Die Gruppe 3 wurde am 11. Juli 2023 zur Erweiterung des Artspektrums vollständig neu bepflanzt (Tabelle 2). Die Artauswahl fiel bei Gruppe 3 auf Arten mit Wildstaudencharakter auf frischen Böden mit wechselnden Blühphasen über die Vegetationsperiode hinweg. Die Blüten dieser Arten können als eine wertvolle Nahrungsquelle für viele Insekten, insbesondere Wildbienen, dienen.

Tabelle 2: Liste verwendeter Arten

Botanischer Name	Deutscher Name
Gruppe 1 und 2	
Bergenia cordifolia	Altai-Bergenie
Brunnera macrophylla	Kaukasus-Vergissmeinnicht
Geranium x magnificum ‚Rosemoore'	Pracht-Storchschnabel
Lysimachia punctata	Gelbweiderich
Bistorta[1] amplexicaule	Kerzen- Knöterich
Gruppe 3	
Alchemilla mollis	Frauenmantel
Campanula rotundifolia	Rundblättrige Glockenblume
Campanula punctata-Hybr. 'Sarastro'	Großblütrige Glockenblume
Hemerocallis citrina	Zitronen-Taglilie
Knautia macedonica ‚Mars Midget'	Kleine Purpur-Witwenblume
Molinia arundinacea 'Cordoba'	Hohes Pfeiffengras

Von den insgesamt 21 Forschungsfeldern sind 6 Stück mit filtriertem Grauwasser beschickt worden: jeweils ein minimal, ein medial und ein maximal bewässertes Feld der Gruppen 2 und 3. Somit ist in beiden Gruppen ein direkter Vergleich zwischen Feldern mit geklärter und mit filtrierter Grauwasserbewässerung möglich. In Gruppe 1 wurde auf eine Bewässerung mit filtriertem Grauwasser verzichtet, da hier kein Vergleichsfeld für das minimale Regime vorhanden gewesen wäre.

Beginnend Ende 2023 war das gesamte Forschungsgründach im Frühjahr 2024 von einem Schädlingsbefall mit Dickmaulrüsslerlarven betroffen. Der Befall trat gruppenübergreifend sowie auch auf den unbewässerten Nebenflächen des Forschungsgründachs auf. Demnach liegen keine Hinweise vor, dass die Verwendung von geklärtem oder filtriertem Grauwasser das Risiko eines Befalls erhöht. Zudem ist der Dickmaulrüssler ein verbreiteter Schädling auf Dachbegrünungen.

Aufgrund des Befalls kam es insbesondere in Gruppe 1 zu einem großflächigen Pflanzenausfall. Am 25. April 2024 folgte zur Schädlingsbekämpfung eine Nematodenbehandlung des gesamten Gründachs und einer fast vollständigen Neupflanzung der Lysimeterfelder (Flächen 1 bis 3 in Gruppe 1) am 04. Juni 2024. Im Zuge der Nematodenbehandlung mussten alle Forschungsfelder mitsamt der Nebenflächen

[1] **Im Forschungsbericht für 2022 (Lohaus et al., 2023) als Polygonum bezeichnet**

aufgrund der Witterung für 7 Tage mit zusätzlichen Trinkwassergaben feucht gehalten werden. In den Forschungsfeldern der Gruppe 1 sind in den Lysimeterfeldern insgesamt 50 Pflanzen neugepflanzt worden (24 Geranium, 10 Lysimachia, 10 Bergenien und 6 Brunnera); in Gruppe 2 wurden ebenfalls ausgefallene Pflanzen (26 Geranium, 4 Lysimachia und 3 Bergenien) ersetzt. In Gruppe 3 waren keine Nachpflanzungen erforderlich, da die Felder weniger vom Schädling betroffen waren. Da es sich infolge dessen in den Lysimeterfeldern der Gruppe 1 um einen fast gänzlich jungen Pflanzenbestand handelt, werden die Felder nicht wie im vorigen Forschungsbericht von Lohaus et al. (2023) gemeinsam mit Gruppe 2 ausgewertet, sondern separat betrachtet (Kapitel 4.3.2). Die Auswertung der Individuenzahlen in Kapitel 4.3.3 legt nahe, dass Geranium in Gruppe 2 nicht durch Schäden des Dickmaulrüsslers eingegangen sind, sondern vor allem durch Konkurrenz mit anderen Arten (v. a. Bistorta) verdrängt wurden. Bistorta war die einzige Art, bei der keine sichtbaren Schäden durch die Dickmaulrüsslerlarven festgestellt wurden und die daher auf dem gesamten Gründach vollständig erhalten blieb.

Um zu evaluieren, ob einzelne Felder im Juni/Juli 2023 sowie im darauffolgenden Jahr vor Wiederaufnahme der Bewässerung Anfang April 2024 mit einem Wachstumsvor- oder -nachteil gestartet sind, erfolgt zunächst ein Vergleich der Ausgangssituation anhand der Deckungsgrade zwischen den Feldern.

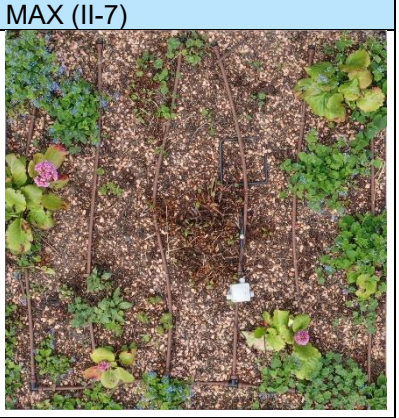
Vor Beginn der Bewässerung mit filtriertem Grauwasser weisen jeweils die beiden minimal bewässerten Felder (mit 81 %) und jeweils die beiden maximal bewässerten Felder der Gruppe 2 (mit 85 %) bei geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung identische Deckungsgrade auf (12.06.2023). Bei den beiden medial bewässerten Feldern ist bei filtrierter Bewässerung ein leichter Vorsprung von 7 % zu verzeichnen (Abb. 5).

Geklärtes Grauwasser		
MIN (II-2)	MED (II-3)	MAX (II-7)
81 % Bedeckung	74 % Bedeckung	85 % Bedeckung

Filtriertes Grauwasser		
MIN (II-5)	MED (II-6)	MAX (II-4)
81 % Bedeckung	81 % Bedeckung	85 % Bedeckung

Abbildung 5: Vergleich der Ausgangsituation der Deckungsgrade der Gruppe 2 am 12.06.2023 vor Beginn der filtrierten Grauwasserbewässerung (Drohnenaufnahmen)

In 2024 wendet sich dieses Bild und die Felder, die mit filtriertem Grauwasser beschickt wurden, weisen am 02. April 2024 (vor Bewässerungsbeginn) in Gruppe 2 in allen Regimen im Vergleich zum geklärten Grauwasser einen Rückstand in der Bedeckung von bis zu 19 % im minimalen Regime auf (Abb. 6). Diese Unterschiede lassen sich sowohl auf den Befall mit den Larven des Dickmaulrüsslers zurückführen, der die Pflanzen durch Wurzelschäden in ihrer Entwicklung hemmt, als auch auf eine Artverdrängung.

Geklärtes Grauwasser		
MIN (II-2)	MED (II-3)	MAX (II-7)
		
53 % Bedeckung	44 % Bedeckung	42 % Bedeckung

Filtriertes Grauwasser		
MIN (II-5)	MED (II-6)	MAX (II-4)
34 % Bedeckung	36 % Bedeckung	36 % Bedeckung

Abbildung 6: Vergleich der Ausgangsituation der Deckungsgrade der Gruppe 2 am 02.04.2024 vor Beginn der filtrierten Grauwasserbewässerung (Drohnenaufnahmen)

Die Gruppe 3 weist direkt nach ihrer Neupflanzung am 11. Juli 2023 sowie auch in 2024 minimale Unterschiede von maximal 4 % zwischen den Feldern gleichen Regimes vor Beginn der Grauwasserbewässerung auf (Abb. 7 und 8).

Geklärtes Grauwasser		
MIN (III-1 und III-7)	MED (III-2)	MAX (III-6)
Ø 14 % Bedeckung	12 % Bedeckung	10 % Bedeckung
Filtriertes Grauwasser		
MIN (III-4)	MED (III-5)	MAX (III-3)
10 % Bedeckung	13 % Bedeckung	13 % Bedeckung

Abbildung 7: Vergleich der Ausgangsituation der Deckungsgrade der Gruppe 3 am 17.07.2023 vor Beginn der filtrierten Grauwasserbewässerung (Drohnenaufnahmen)

Geklärtes Grauwasser		
MIN (III-1 und III-7)	MED (III-2)	MAX (III-6)
Ø 21 % Bedeckung	22 % Bedeckung	20 % Bedeckung
Filtriertes Grauwasser		
MIN (III-4)	MED (III-5)	MAX (III-3)
18 % Bedeckung	20 % Bedeckung	24 % Bedeckung

Abbildung 8: Vergleich der Ausgangsituation der Deckungsgrade der Gruppe 3 am 02.04.2024 vor Beginn der filtrierten Grauwasserbewässerung (Drohnenaufnahmen)

Die Deckungsgrade aller drei Gruppen vor Beginn der Bewässerungen zeigen demnach, dass die Felder gleichen Bewässerungsregimes mit vergleichbaren Ausgangsituationen in die Vegetationsperioden starten. Lediglich Feld II-5 (minimale Bewässerung mit filtriertem Grauwasser) liegt in 2024 mit 19 % geringerer Bedeckung deutlich hinter dem Feld II-2 (minimale Bewässerung mit geklärtem Grauwasser) zurück.

4.3 Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln sind die Versuchsergebnisse für die Untersuchungsperiode 2023 und 2024 dargestellt. Da die pflanzenphysiologischen Parameter durch die realen Einbaubedingungen des Gründachs erheblich von der Witterung beeinflusst werden können, werden vor der Vorstellung der Ergebnisse in Kapitel 4.3.1 zunächst die monatlichen Niederschlagssummen und die Durchschnittstemperaturen für 2023 und 2024 erläutert. Anschließend werden in Kapitel 4.3.2 die Felder der Gruppe 1 unter Berücksichtigung des Befalls mit Dickmaulrüsslerlarven und damit verbunden dem jungen Pflanzenbestand sowie aufgrund der Bewässerung alleinig mit geklärtem Grauwasser separat betrachtet. In den Kapiteln 4.3.3 und 4.3.4 werden die Ergebnisse der Gruppen 2 und 3 vorgestellt, die eine unterschiedliche Bepflanzung aufweisen. Deren Versuchsaufbau umfasst sowohl Felder mit geklärter als auch mit filtrierter Grauwasserbewässerung. Dadurch ist ein Vergleich der Auswirkungen der beiden Wasserqualitäten auf die Pflanzungen möglich. Die Forschungsfelder der Gruppe 1 bis 3 unterliegen standortspezifischen Verschattungen, die teilweise zu Abweichungen von der erwarteten Vegetationsentwicklung führten. Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, wird zu Beginn der Unterkapitel für jede Gruppe die Verschattungssituation der Forschungsfelder erläutert. In Kapitel 4.3.5 wird zudem die Entwicklung der unbewässerten Nebenflächen thematisiert.

4.3.1 Klimatische Bedingungen in 2023 und 2024

Für die Auswertung der Witterung wurden die Daten der Wetterstation in Dresden-Strehlen herangezogen. Die klimatischen Bedingungen in Dresden im Jahr 2023 und 2024 wiesen teils signifikante Schwankungen auf, die sowohl die Pflanzenvitalität als auch die Effizienz der untersuchten Bewässerungsregime beeinflussen können.

Witterung in 2023

Die Niederschlagsmengen lagen in 2023 insgesamt bei 694 mm. Das entspricht einem Niederschlagsüberschuss von circa 26 mm im Vergleich zur Klimareferenzperiode 1961 bis 19902. Nichts desto trotz gab es zwei erhebliche Trockenphasen im Mai sowie im September. Mit 11,6 °C überstieg die Jahresmitteltemperatur zudem den Klimareferenzwert 1961 bis 1990 um 2,8 °C.

Niederschlag

Der Januar startete mit 32 mm mit einem Niederschlagsdefizit von 30 %, während der Februar und März etwas über dem Durchschnitt von 1961-1990 lag (Abb. 9). Der April verzeichnete 54 mm, was dem klimatischen Mittel entsprach. Im Mai war es mit nur 17 mm extrem trocken (46 mm weniger im Vergleich zur Klimareferenzperiode). Der Juni lag mit 88 mm Niederschlag 17 % über dem Durchschnittsniveau und brachte ein

---

2 **Wetterdaten der Klimareferenzperiode von der Wetterstation Dresden Flughafen, Sachsen:** ***https://www.dwd.de/DWD/klima/beratung/ak/ak_104880_di.pdf***

Starkregenereignis am 22.06.2023. Der Juli fiel dahingegen mit 51 mm und einer geringeren Niederschlagsmenge im Vergleich gering zum Durchschnitt aus. Der August hatte vereinzelt sehr regenreiche Tage zu verzeichnen. Der September war hingegen extrem trocken (8,8 mm; 42 mm weniger gegenüber der Klimareferenzperiode). Der Oktober brachte einen deutlichen Anstieg mit 98 mm Niederschlag, die über zweimal so hoch waren wie der Durchschnitt.

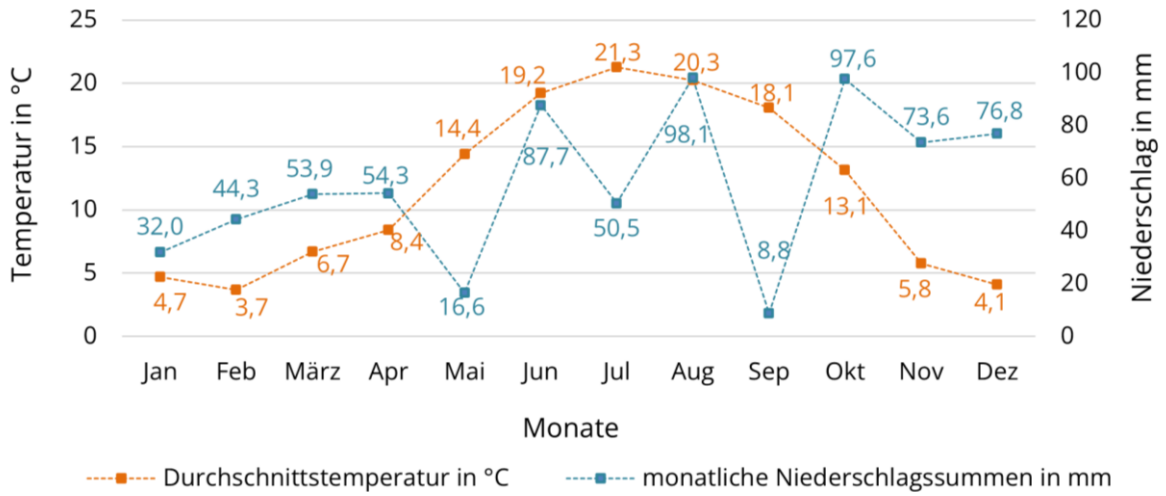


Abbildung 9: Monatliche Niederschlagssummen und Durchschnittstemperaturen in 2023 in Dresden-Strehlen

Temperaturen

Im Januar 2023 begann das Jahr ungewöhnlich warm mit einer Monatsmitteltemperatur von 4,7 °C, was deutlich über dem Wert der Klimareferenzperiode von -1,0 °C lag. Auch der Februar und März waren milder (bis zu 3,7 °C über dem Normalwert). Im April und Mai stiegen die Temperaturen moderat an. Im Juni erreichte die Temperatur aufgrund einer Hitzewelle erstmals die 30-Grad-Marke und lag 2,2 °C über dem Mittel. Der Juli brachte mit durchschnittlich 3,3 °C höheren Temperaturen ebenfalls heiße Tage. Der August zeigte sich zunächst kühl, ehe ab Mitte des Monats eine Hitzewelle mit bis zu 30 °C einsetzte. Der September war einer der wärmsten und sonnigsten seit 1961 (4,1 °C über dem Klimadurchschnitt). Auch der Oktober war ungewöhnlich warm, mit einem Monatsmittel von 13,1 °C. Der November begann mild, bevor kalte Luft im Laufe des Monats die Temperaturen senkte. Der Dezember war wiederum von milden Temperaturen geprägt, mit Tageshöchstwerten von bis zu 11,4 °C an Weihnachten.

Witterung in 2024

Im Jahr 2024 betrug die jährliche Niederschlagsmenge in Dresden-Strehlen 653 mm und lag damit um 15 mm unter dem Mittelwert des Klimareferenzzeitraums 1961–1990, obwohl der August durch mehrere Starkregenereignisse geprägt war. Die Jahresmitteltemperatur erreichte 11,7 °C und überschritt damit den Referenzwert um 2,9 °C, ähnlich wie bereits im Jahr 2023.

Niederschlag

In 2024 fiel im Frühjahr der Februar sehr feucht aus (+24 mm im Vergleich zu 1991-1990), was der Vegetation half, mit der beginnenden Trockenheit umzugehen. Im März fiel mit 11 mm extrem wenig Niederschlag und auch der April blieb im Vergleich zum langjährigen Mittel zu trocken. Der Sommer brachte viele sonnige Tage und die Regenmengen lagen weit unter dem der Klimareferenzperiode: Besonders im August kam es jedoch zu einem außergewöhnlichen Starkregenereignis, bei dem allein am 18. August 91 mm Regen fielen. Im Oktober fiel mit 31 mm rund 31 % weniger Niederschlag als im Klimareferenzzeitraum und auch im November regnete es weniger als üblich. Das Jahr 2024 endete mit einem milden Dezember, in dem das Niederschlagsdefizit weiter fortbestand.

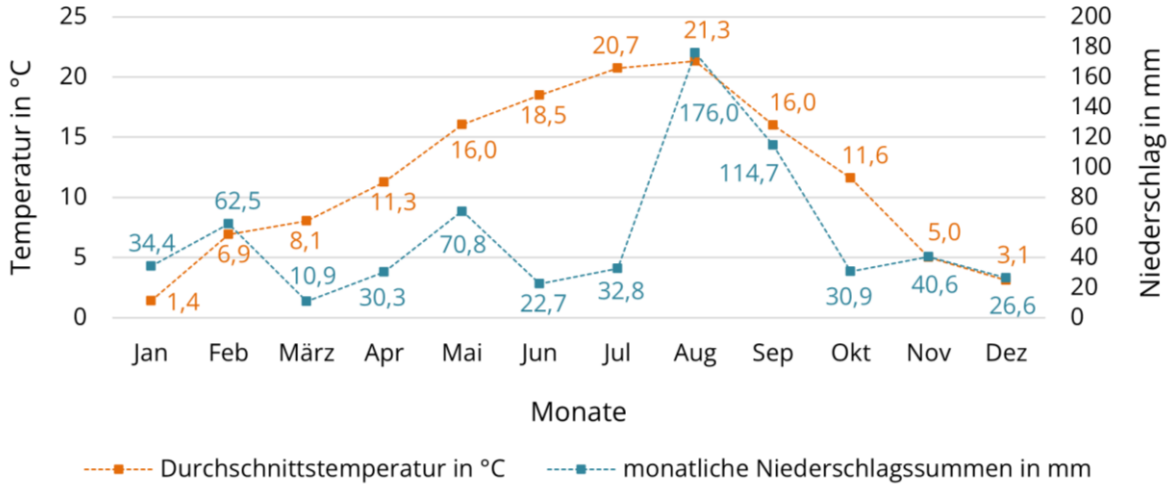


Abbildung 10: Monatliche Niederschlagssummen und Durchschnittstemperaturen in 2024 in Dresden-Strehlen

Temperaturen

In 2024 begann der Frühling in Dresden mit recht hohen Temperaturen. Der März stellte dabei einen Rekord auf und war einer der wärmsten sowie trockensten seit 1961. Im April wurden bereits die ersten vier Sommertage mit Höchsttemperaturen von bis zu 26,7 °C gezählt. Die hohen Temperaturen seit Jahresbeginn führten tendenziell frühzeitig zu Blattaustrieb. Im April gab es jedoch einen Kälteeinbruch mit Minimaltemperaturen von -1,7 °C. Die hohen Temperaturen im Mai, die einen durchschnittlichen Wert von 16 °C erreichten, machten den Frühling nichts desto trotz zu einem der Wärmsten seit 1961 in Dresden. Der Sommer setzte diese Entwicklung fort: Er war überdurchschnittlich warm und sehr sonnig. Ende Juni begann eine erste Hitzewelle, bei der erstmals Temperaturen von über 30 °C gemessen wurden. Besonders hohe Temperaturen wurden im August verzeichnet (Temperaturen über 30 °C an fünf aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Höchsttemperatur von 32,9 °C). Der meteorologische Herbst begann im September mit außergewöhnlich hochsommerlichen Temperaturen von bis zu 31,1 °C. Die Herbstmonate waren ebenfalls zu warm, jedoch gestaltete sich der Erwärmungstrend im

Herbst am geringsten. Der Dezember zeichnete sich durch eine hohe Sonnenscheindauer und zu milden Temperaturen aus.

4.3.2 Gruppe 1: Einfluss Wasserdargebot auf Vitalität bei geklärter Grauwasserbewässerung

Die Forschungsfelder der Gruppe 1 wurden im Gegensatz zu Gruppe 2 und 3 ausschließlich mit geklärtem Grauwasser bewässert, da die Anzahl der Forschungsfelder dort keine Vergleichsfelder zuließ. Aufgrund des großflächigen Befalls mit Dickmaulrüsslerlarven, der insbesondere die ersten drei Felder I-1 bis I-3 betraf, erfolgt die Auswertung nicht zusammengefasst für jedes Bewässerungsregime, sondern für jedes Feld separat. Im Folgenden werden die Parameter Wuchshöhe, Individuenzahl, blühende Individuen, Deckungsgrad sowie Blattmenge, -größe und -gesundheit für die Jahre 2023 und 2024 dargestellt und analysiert.

Die Ergebnisse der Gruppe 1 werden durch unterschiedlich stark ausgeprägte Verschattungen infolge des angrenzenden Verwaltungsgebäudes beeinflusst. Die Abbildungen 11a und 11 b zeigen exemplarisch, dass zwischen 14:00 und 17:00 Uhr die Felder I-1 bis I-3 sowie teilweise die Referenzfläche I-4 beschattet sind, während die Felder I-5 und I-6 sonnenexponiert bleiben. Die aus der Verschattung resultierenden milderen Temperaturverhältnisse sind bei der Interpretation der Vegetationsentwicklung entsprechend zu berücksichtigen.

Abbildung 11a: Schattenwurf auf die Gruppe 1 (Bewässerung mit geklärtem Grauwasser): Drohnenaufnahme vom 21. August 2023 um 17:00

Abbildung 11b: Schattenwurf auf die Gruppe 1: Schattendiagramm für Gruppe 1 aus 3D-Modell mit Sonnenverlauf für Dresden am 30. Juli um 9:00 (links), 12:00 (mittig) und 15:00 (rechts)

Wuchshöhe

Für die Bewertung der maximalen Wuchshöhe ist in einem ersten Schritt der Mittelwert aller Arten eines Feldes berechnet worden. In 2023 ist kein eindeutiger Wachstumsvorteil bei den Feldern mit höherer Bewässerungsintensität festzustellen (Abb. 12). Jedoch zeigen jeweils Feld I-5 (Maximalbewässerung) und Feld I-6 (Medialbewässerung) niedrigere Werte als die Felder I-1 und I-2 mit gleicher Bewässerungsintensität. Dies ist auf die höhere Beschattung der Felder I-1 bis I-3 zurückzuführen, die sich in insbesondere in heißen Sommermonaten positiv auf den Pflanzenwuchs auswirkt. Es herrschen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Feldern bzw. den Regimen. Demzufolge liegen auch die Maximalhöhen der Pflanzungen sehr nah beieinander: Den größten Wuchs weisen die Felder mit Maximalbewässerung auf (Feld I-5 mit 45 cm am 13.10.2023 und Feld I-1 mit 43 cm am 02.10.2023). Die Pflanzungen mit medialer und minimaler Bewässerung erreichen eine Höhe von 42 cm, wobei die minimal bewässerte Vegetation ihre Maximalhöhe als Letzte erreicht (am 27.10.2023). Im Untersuchungsjahr 2022, in dem die Mittelwerte über alle Gruppen hinweg gebildet werden konnten, zeigte sich gleichmäßige Abstufung der erzielten Wuchshöhen entsprechend der jeweiligen Bewässerungsintensität. Als Ursache hierfür ist das deutlich trockenere Klima im Jahr 2022 anzusehen (473 mm Jahresniederschlag bei einer mittleren Jahrestemperatur von 11,5 °C gegenüber 694 mm und 11,6 °C im Jahr 2023). Besonders auffällig ist der Unterschied im Zeitraum von Januar bis Juli, in dem im Jahr 2023 etwa 71 % mehr Niederschlag registriert wurde als im Vergleichszeitraum 2022 (340 mm gegenüber 199 mm; vgl. Anhang 1: Klimadiagramm 2022).

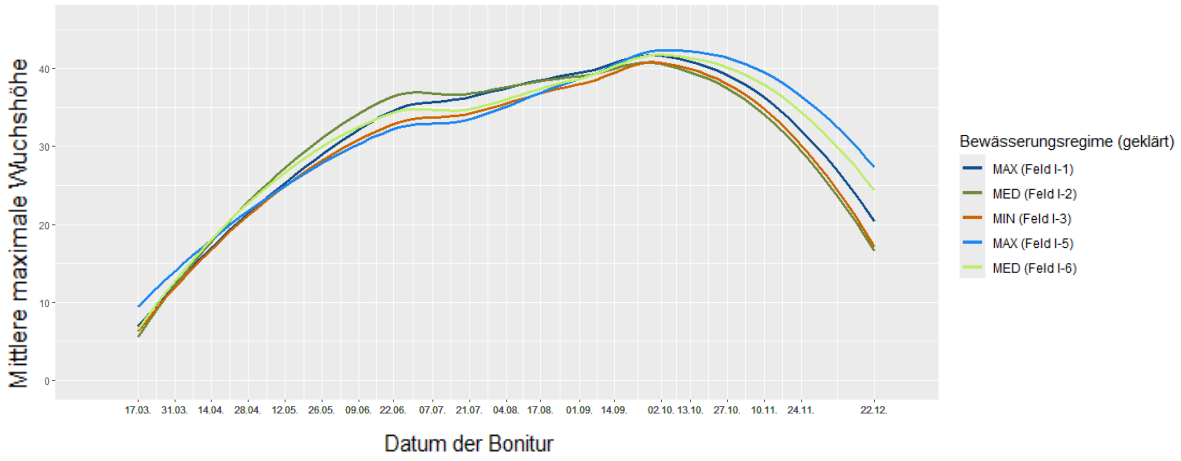


Abbildung 12: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten je Feld der Gruppe 1 bei geklärter Grauwasserbewässerung in 2023

In 2024 (Abb. 13) ist der Dickmaulrüsslerlarven-Befall eindeutig an der Höhenentwicklung der Pflanzungen zu sehen. Die Felder I-5 (Maximalbewässerung) und I-6 (Medialbewässerung) sind nicht von dem Schädlingsbefall betroffen und weisen deutlich größere Wuchshöhen von bis zu 47 cm (I-6) und 46 cm (I-5) auf. Die Felder I-1 bis I-3 wurden am 04. Juni 2024 fast gänzlich neu bepflanzt und befinden sich demnach im Gegensatz zu den etablierten Pflanzungen (Felder I-5 und I-6) in ihrer ersten Vegetationsperiode, in der sie noch nicht in der Lage sind ihre volle Größe zu erreichen sowie einen dichten Bestand zu bilden. Nichtsdestotrotz ist insbesondere ab Mitte Juli ein Unterschied zwischen den Regimen der Neupflanzungen zu erkennen. Signifikante Differenzen sind im Hochsommer (01.07.-30.09.2024) zwischen dem maximalen und minimalen Regime (Feld I-1 vs. I-3) zu verzeichnen ($p = 0.01$, mittlere Differenz von 5.3 cm). Analog zum Untersuchungsjahr 2022 (Lohaus et al., 2023) finden sich demnach Hinweise auf eine erhöhte Wuchsleistung in den mit dem Bewässerungsregime „Maximalbewässerung“ eingerichteten Forschungsfeldern. Grund für die größeren Differenzen als in 2023 ist die geringere Niederschlagsmenge in der ersten Jahreshälfte (von Januar bis Juli 265 mm in 2024 vs. 340 mm in 2023 und 199 mm in 2022), auch wenn es in 2024 (mit 653 mm Niederschlagssumme bei 11,7 °C Durchschnittstemperatur) insgesamt deutlich feuchter war als in 2022 (473 mm bei 11,5 °C).

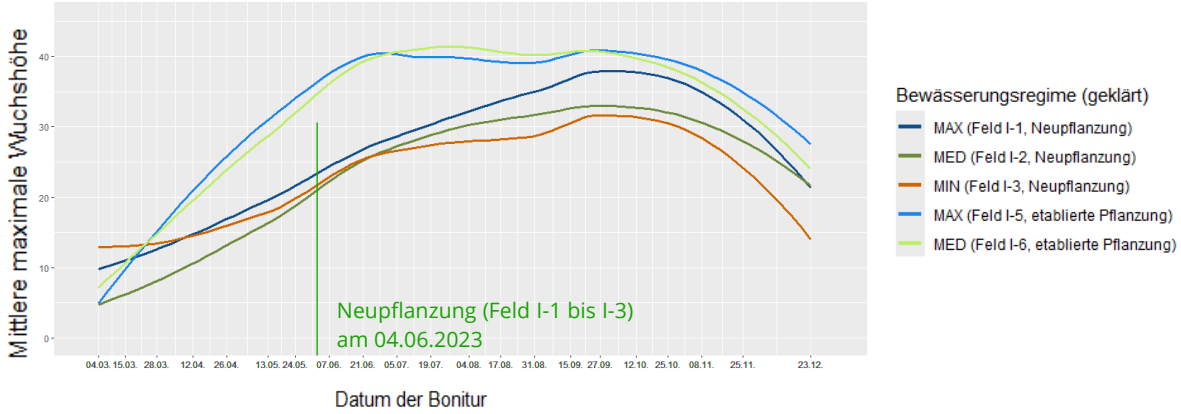


Abbildung 13: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten je Feld der Gruppe 1 bei geklärter Grauwasserbewässerung in 2024

Individuenzahl

Die Individuenzahl liefert Erkenntnisse über Artverluste oder -zuwächse und wurde erstmals ab Juli 2023 mit dem überarbeiteten Bonitur-Aufnahmebogen erfasst. Während die Individuenzahlen im Jahr 2023 weitgehend stabil blieben und eher geringe Schwankungen aufwiesen, zeigte sich im Frühjahr 2024 (Abb. 14) in den Lysimeterfeldern (Felder I-1 bis I-3) der Gruppe 1 deutlich der Befall durch Dickmaulrüsslerlarven, der zu erheblichen Individuenverlusten von bis zu 21 Individuen beim minimalen Feld (I-3), 15 beim medialen Feld (I-2) und 9 beim maximalen Feld (I-1) führte. Besonders betroffen waren die Arten Geranium, Bergenie und Lysimachia, während Bistorta von diesem Befall kaum beeinträchtigt wurde. Die unterschiedlichen Bewässerungsregime führten in den Lysimeterfeldern zu keiner signifikanten Zu- oder Abnahme der Individuenzahlen. Die Fluktuationen in den Individuenzahlen sind auf die Brunnera zurückzuführen (siehe Anhang 2). Diese Art vermehrt sich durch Versamung, wobei die Keimung schnell erfolgt und zunächst zu einer Zunahme der Individuen führt. Allerdings überleben nicht alle Keimlinge, was in einer späteren Abnahme der Population resultiert.

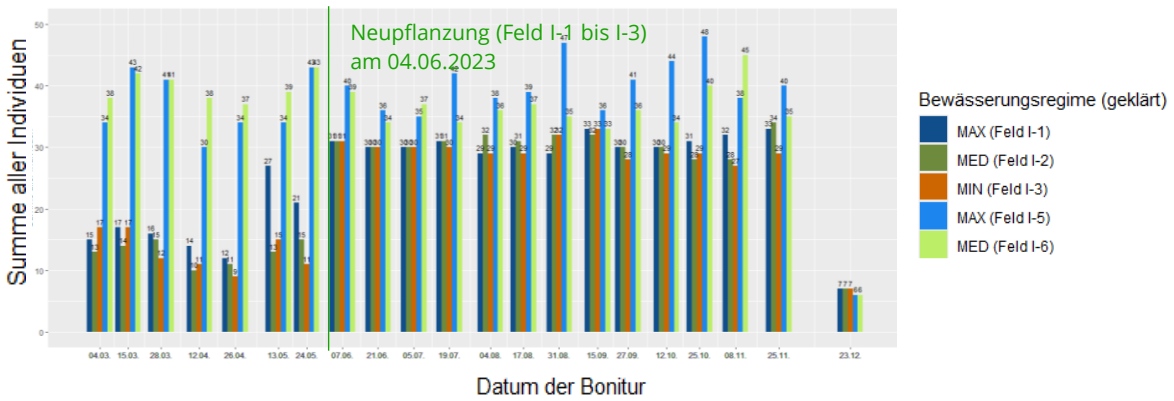


Abbildung 14: Summe aller Individuen je Feld der Gruppe 1 bei geklärter Grauwasserbewässerung in 2024

Blühende Individuen

Die Ergebnisse des Jahres 2023 sind aufgrund der Neueinführung des Parameters nur sehr eingeschränkt aussagekräftig. Die Ergebnisse ab Ende Juli deuten darauf hin, dass eine höhere Bewässerungsmenge mit geklärtem Grauwasser tendenziell eine Zunahme an blühenden Individuen begünstigt. In 2024 sind aufgrund der Pflanzenausfälle, verursacht durch die Dickmaulrüsslerlarven und der anschließenden Neupflanzungen in den Lysimeterfeldern (Feld I-1 bis I-3), keine verlässlichen Aussagen über das Blühverhalten möglich (Abb. 15).

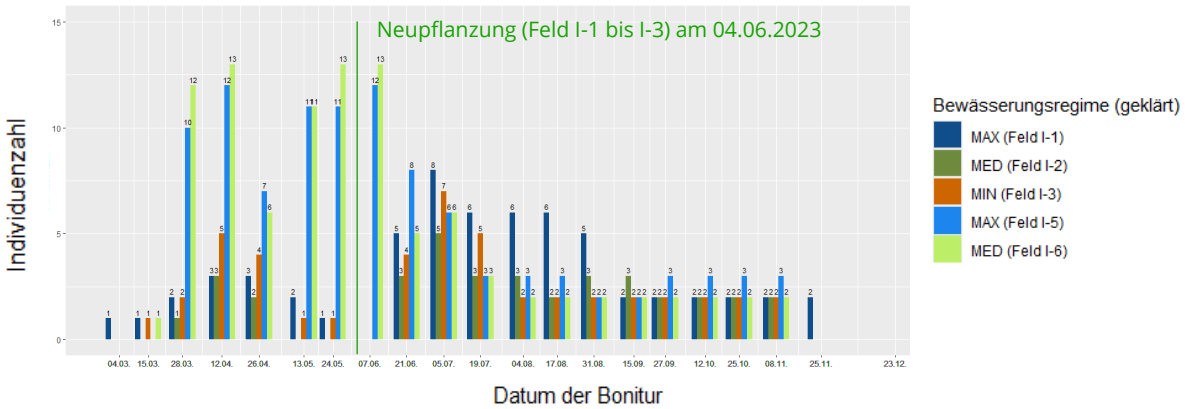


Abbildung 15: Summe blühender Individuen der Gruppe 1 im Jahr 2024; im 1. Halbjahr waren die Forschungsfelder von Dickmaulrüsslerlarven betroffen; fast vollständige Neupflanzungen erfolgten am 4. Juni 2024

Deckungsgrad

Für die fotografische Auswertung der Deckungsgrade wurde anhand der in einem zweiwöchigen Turnus aufgenommenen Drohnenaufnahmen manuell die Vegetation bestimmt. Im Jahr 2023 (Abb. 16) verzeichnete das maximal bewässerte Feld I-1 im Hochsommer eine kontinuierlich hohe Bedeckung. So fällt bspw. die Bedeckung des maximalen Regimes (Feld I-1, 95 %) am 24. Juli 2023 um 10 % höher aus als die der Pflanzung des minimalen Regimes (mit 85 %-iger Bedeckung), unterscheidet sich jedoch mit 4 % nur geringfügig zum medialen Feld I-2 (mit 91 %-iger Bedeckung). Obwohl das minimal bewässerte Feld über den Sommer einen deutlich geringeren Deckungsgrad aufweist, kann es Anfang September 2023 vergleichbare Werte wie die medial und maximal bewässerten Felder erreichen. Im Untersuchungsjahr 2022 (Lohaus et al., 2023) waren aufgrund der sehr trockenen Witterung deutlich geringere Deckungsgrade beim minimalen Feld festzustellen (63 % am 22.07.2022). Demzufolge waren in 2022 die Unterschiede zum maximal bewässerten Feld zum selbigen Zeitpunkt mit 32 % und der Unterschied zwischen maximal und medial bewässerten Feld mit 13 % entsprechend höher als in 2023. Demnach wirkt sich eine zusätzliche Bewässerung in trockenen Jahren deutlich stärker auf die Vegetationsentwicklung aus.

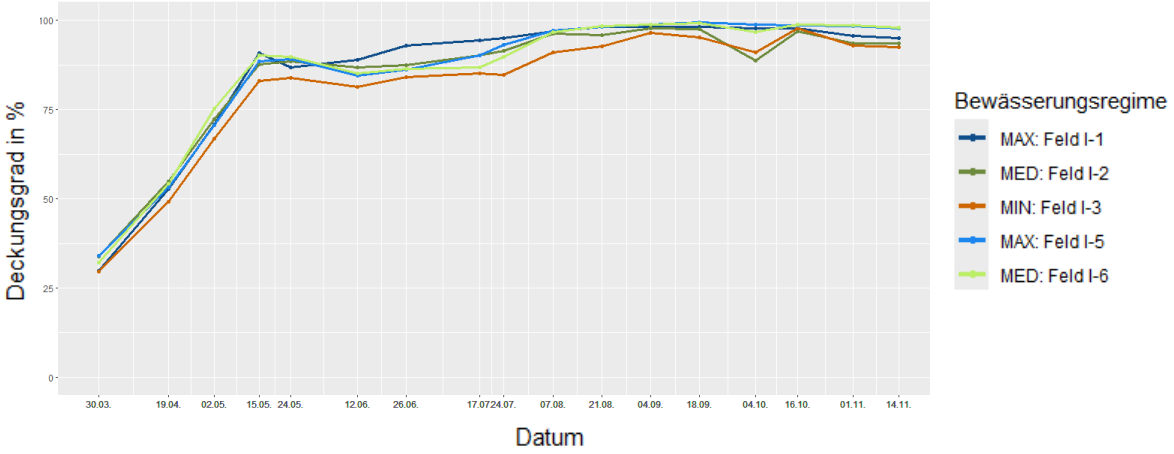


Abbildung 16: Deckungsgrade der Gruppe 1 in 2023 (Graphische Auswertung der UAV-Aufnahmen)

In Abb. 17 des Jahres 2024 zeigt sich bei den Feldern I-1 bis I-3 im Vergleich zum Vorjahr die starke Beeinträchtigung der Pflanzungen durch die Dickmaulrüsslerlarven. Infolge dessen hatten die Felder I-5 und I-6 deutlich höhere Deckungsgrade zu verzeichnen: Beide Pflanzungen erreichten einen Deckungsgrad von 100 % im Oktober 2024. Die Anfang Juni neu bepflanzten Felder I-1 bis I-3 starteten mit jeweils gleichen Deckungsgraden. Das maximal bewässerte Feld (I-1) profitierte in den anschließenden heißen und niederschlagsarmen Sommermonaten (Juni und Juli 2024 mit lediglich 23 mm bzw. 33 mm Niederschlag) besonders von der hohen Bewässerungsmenge und zeigte entsprechend das ausgeprägteste Wachstum. Die größten Unterschiede zwischen den Pflanzungen der ersten drei Felder traten am 22. August auf: Während bei maximaler Wasserverfügbarkeit eine Bedeckung von 74 % erreicht wurde, war die Bedeckung auf dem Feld mit mittlerer Grauwasserbewässerung um 13 % und beim minimalen Regime sogar um 26 % geringer. Die kurzzeitige höhere Bedeckung des minimalen Feldes vom 22.07. bis 05.08. ist auf ein Pflegedefizit zurückzuführen. Dadurch konnten sich innerhalb kürzester Zeit insbesondere auf dem minimal bewässerten Feld Beikräuter rasch ausbreiten und so stark aufwachsen, dass sie alle bis dato vorhandenen Vegetationslücken auffüllen konnten.

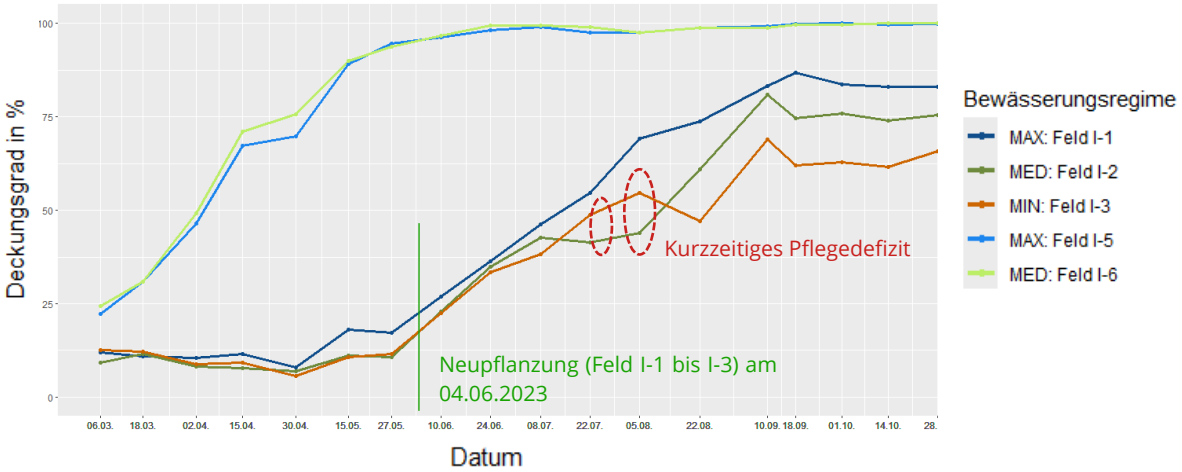


Abbildung 17: Deckungsgrade der Gruppe 1 in 2024 (Graphische Auswertung der UAV-Aufnahmen); Neupflanzungen am 04. Juni 2024

Blattmenge, -größe und -gesundheit

Die Anzahl der Blätter, deren Größe sowie -Gesundheit sind während der Bonituren auf einer 9-stufigen Skala nach Tabelle 3 bewertet worden.

Tabelle 3: Skala Blattanzahl (links), Skala Blattgröße (mittig) und Skala Blattgesundheit (rechts)[3]

Skala	Blattanzahl
1	Keine
2	
3	Wenige
4	
5	Normal viele
6	
7	Zahlreiche
8	
9	Sehr viele

Skala	Blattgröße
1	Sehr klein
2	
3	Klein
4	
5	Normal groß
6	
7	groß
8	
9	Sehr groß

Skala	Blattgesundheit
1	Krank
2	
3	Wenig gesund
4	
5	Mäßig gesund
6	
7	Gesund
8	
9	Sehr gesund

Obwohl die Pflanzungen im Frühjahr 2023 sehr unterschiedliche Blattmengen aufwiesen, erreichten alle Felder der Gruppe 1 im Juni nahezu die gleiche mittlere Blattanzahl mit einer Differenz von lediglich 0,6 Stufen (Minima Stufe 4,8 (Feld I-3, Minimalbewässerung), Maxima 5,4 (Feld I-6, Medialbewässerung) am 22.06.2023; Abb. 18). Dies entspricht gemäß Bewertungsskala normal vielen Blättern. Ab Ende Juli / Anfang August zeichnet sich ab, dass die Felder I-5 (Maximalbewässerung) und I-6 (Medialbewässerung) bis zum Ende der Vegetationsperiode tendenziell eine höhere Blattanzahl besitzen, auch wenn die Differenz im Maximum lediglich 0,8 Stufen entspricht. So erreicht das Feld I-2 (Medialbewässerung) am 27. Oktober nur noch die Stufe 4 (wenige bis normal viele Blätter), wohingegen das Feld I-6 mit identischer Bewässerungsintensität weiterhin eine normale Blattanzahl aufwies. Der leichte Rückgang der Blattmenge auf den Feldern I-1 bis I-3 deutet möglicherweise auf einen beginnenden Befall durch Dickmaulrüsslerlarven hin, der zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht bekannt war.

Die Unterschiede zwischen den Feldern sind nicht signifikant und deuten darauf hin, dass selbst eine minimale Bewässerung ähnlich viele Blätter wie die mediale Bewässerung oder in den Herbstmonaten die maximale Bewässerung hervorbringen kann. Die ähnlichen Werte in den heißen Sommermonaten, in denen eine Korrelation der Blattmenge mit der Bewässerungsintensität vermutet wurde, kann in den teils regenreichen Tagen im Juni und Anfang Juli 2023 begründet sein (siehe Niederschlagssummen für 2023 in Abb. 9) Das deutlich trockenere Vorjahr 2022 hatte gezeigt, dass die medial und minimal bewässerten Felder im Hochsommer jeweils um eine halbe bis eine Stufe schlechter abschnitten als die maximal bewässerte Pflanzung. Eine zusätzliche Reduzierung der Minimalbewässerung könnte an dieser Stelle Aufschluss darüber geben, inwiefern sich die Bewässerung auf die Blattmenge auswirkt.

[3] Diese Bewertungstabellen werden in gleicher Form auch für Gruppe 2 (Tabelle 8) und Gruppe 3 (Tabelle 12) verwendet.

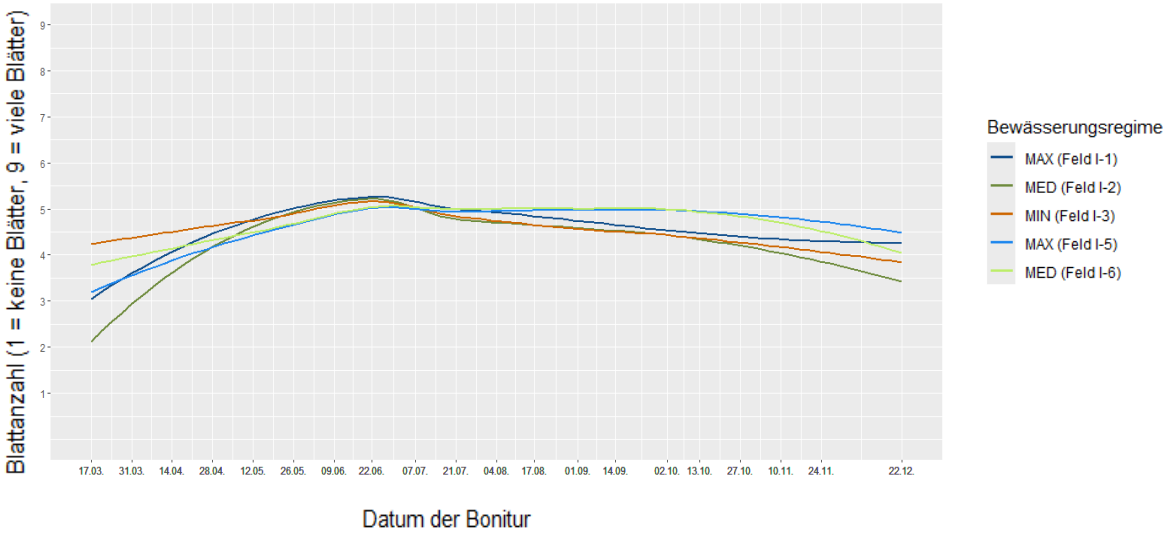


Abbildung 18: Mittlere Blattmenge aller Arten je Feld der Gruppe 1 in 2023

Der Mittelwert der Blattgrößen (Bewertung nach Tabelle 3, mittig) weist in 2023 für alle Bewässerungsregime nahezu identische Werte auf (Abb. 19). Die Höchstwerte für die Blätter betragen bis auf Feld I-3 (Minimalbewässerung) die Stufe 5 (normal große Blätter). Feld I-3 erreicht trotz geringster Bewässerungsintensität eine 0,6 Stufen bessere Bewertung (09.06.2023) als die übrigen Pflanzungen. Im Gegensatz zu dem vorigen Untersuchungsjahr 2022 (Lohaus et al., 2023) unterscheiden sich die Werte jedoch nicht einmal um eine Stufe. Grund hierfür ist das deutlich trockenere Jahr 2022 (Niederschlagssummen 473 mm in 2022 vs. 694 mm in 2023), wodurch die Pflanzung viel stärker von der Bewässerung profitiert als in feuchteren Jahren.

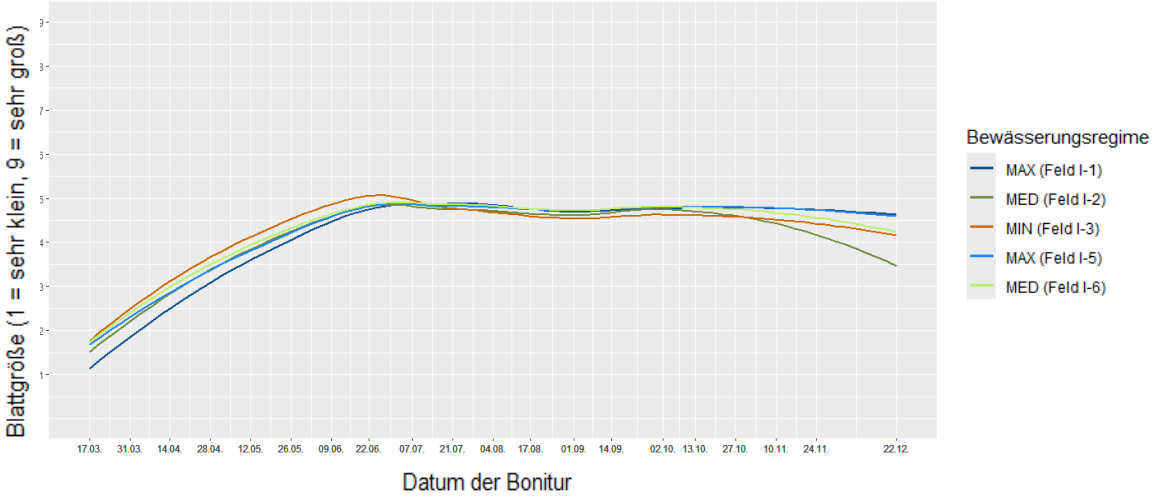


Abbildung 19: Mittlere Blattgröße aller Arten je Feld der Gruppe 1 in 2023.

Auch bei der Beurteilung der Blattgesundheit sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Pflanzungen feststellbar (Abb. 20). Im Gegensatz zu 2022 wurde die Blattgesundheit in 2023 zu Beginn der Bonituren am 17. März als hoch bewertet und erreichte Maximalwerte von bis zu Stufe 8,4. Dies entspricht gesunden bis sehr gesunden Blättern, die gut im Saft stehen, druckresistent, kräftig und farbintensiv sind. Bis zum Sommer nahm die Gesundheit in allen Bewässerungsregimen leicht ab (Minimalwerte von 6,2 für die beiden maximal bewässerten Felder I-1 und I-5). Im September machte

sich die extreme Trockenheit in 2023 mit einer monatlichen Niederschlagssumme von lediglich 8,8 mm bemerkbar, wodurch zumindest eine leichte Korrelation zwischen Bewässerungsintensität und Blattgesundheit bei I-5 (MAX) und I-6 (MED) zu erkennen ist. Auch bei diesem Parameter waren in 2022 stärkere Unterschiede zwischen den Regimen wahrnehmbar: Häufigere Wassergaben führten zu einer besseren Entwicklung der Blätter bzw. zu einer jeweils um eine Stufe verbesserten Bewertung.

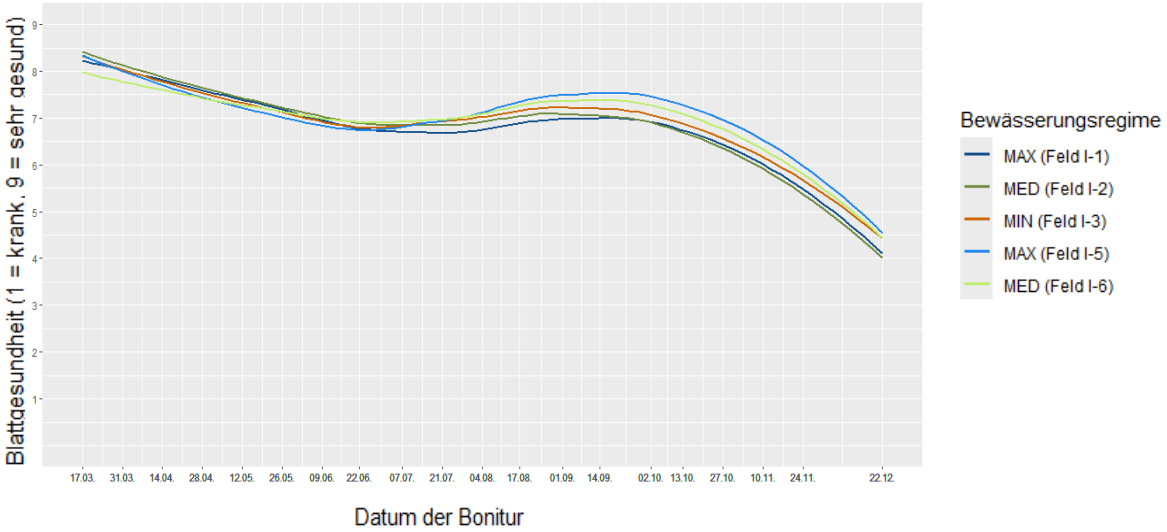


Abbildung 20: Blattgesundheit aller Arten je Feld der Gruppe 1 in 2023.

Die Felder I-1 sowie I-2, welche ebenfalls maximal und medial bewässert werden, zeigen jedoch trotz der ebenfalls höheren Bewässerungsintensität im September an einzelnen Individuen von Geranium braune und welke Blätter, die auf das Vorhandensein erster Dickmaulrüsslerlarven zurückzuführen sind (siehe Vergleich Feld I-1 vs. I-5 in Tab. 4).

Tabelle 4: Exemplarischer Vergleich der Blattgesundheit der Felder mit Maximalbewässerung (Gruppe 1) am 18.09.2023

Forschungsfeld	Drohnenaufnahme
Feld I-1 (Maximalbe-wässerung)	
Feld I-5 (Maximalbe-wässerung)	

Aufgrund der erheblichen Schädigung des Pflanzenbestands durch Larvenbefall in 2023/2024, insbesondere auf den Feldern I-1 bis I-3, sowie der nachfolgenden Neupflanzungen wird für das Jahr 2024 von detaillierten Auswertungen abgesehen. Dies erfolgt im Hinblick auf die noch junge Vegetation und die damit verbundenen Unsicherheiten bei der Dateninterpretation. Die Jungpflanzung zeigte ab Neupflanzung

am 4. Juni tendenziell eine Korrelation zwischen Wasserverfügbarkeit und der Blattmenge. Die Blattentwicklung des maximalen Regimes (Feld I-1) wies dabei Ende September Unterschiede von über einer Stufe im Vergleich zum minimalen Regime (I-3) auf. Ein ähnliches Bild wie bei der Blattmenge zeichnete sich bei der Blattgröße ab. Auch hier ist ab Neupflanzung tendenziell der größte Zuwachs bei der maximalen Bewässerung zu verzeichnen, gefolgt von der medialen Bewässerung und schlussendlich der minimalen Bewässerung.

4.3.3 Gruppe 2: Einfluss Wasserdargebot und Art des Grauwassers auf Vitalität

In den Forschungsfeldern der Gruppe 2 ist ein direkter Vergleich zwischen Pflanzungen des gleichen Bewässerungsregimes mit geklärter- und mit filtrierter Grauwasserbewässerung möglich. Die folgenden Unterkapitel widmen sich insbesondere den Auswirkungen des Einflusses des lediglich filtrierten, d. h. nicht von der Pflanzenkläranlage gereinigtem, Grauwasser auf die Vitalität der einfach-intensiven Dachbegrünung. Als Vergleich zur Verträglichkeit werden die Pflanzungen, die mit geklärtem Grauwasser beschickt wurden, herangezogen.

Die filtrierte sowie die auch die geklärte Grauwasserbewässerung werden in den Untersuchungsjahren 2023 und 2024 von den Pflanzungen der Gruppe 2 generell sehr gut vertragen.

Die Forschungsfelder II-4 bis II-7 der Gruppe 2 unterliegen im Juli ab 18:00 Verschattungen durch umliegende Gehölze. Ein eindeutiger Einfluss dieses Schattenwurfs auf die Pflanzenentwicklung ist jedoch nicht eindeutig erkennbar (Abb. 21a und b).

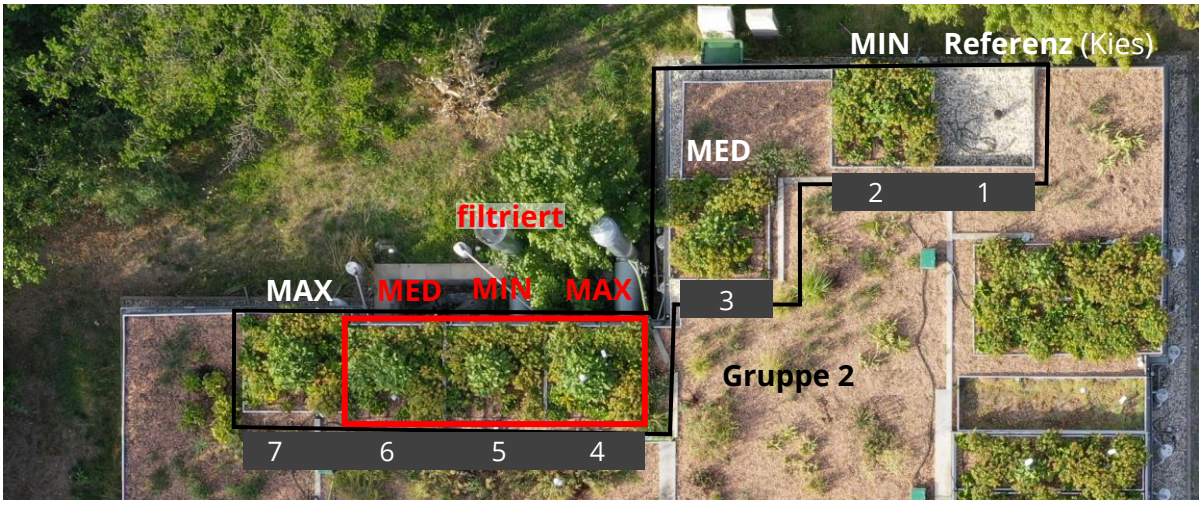


Abbildung 21a: Schattenwurf auf die Gruppe 2: Drohnenaufnahme vom 24. Juli 2023 um 18:00

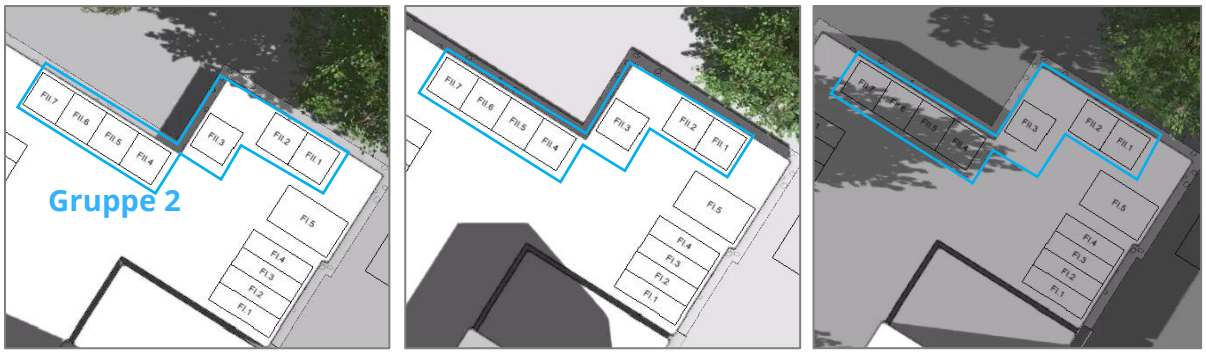


Abbildung 21b: Schattenwurf auf die Gruppe 2: Schattendiagramm aus 3D-Modell mit Sonnenverlauf für Dresden am 30. Juli um 9:00 (unten links), 12:00 (unten mittig) und 18:00 (unten rechts).

Wuchshöhe

Filtrierte Grauwasserbewässerung

Die Bewässerung mit lediglich mechanisch filtriertem, das heißt ungeklärtem, Grauwasser startete erstmals am 22. Juni 2023. Die Maximalbewässerung mit filtriertem Grauwasser bedingte die höchsten Wuchsleistungen der Vegetation (Abb. 22). Am 17. August 2023 lag die maximal bewässerte Pflanzung im Mittel 12,5 cm über der Wuchshöhe der minimal und 3,5 cm über der medial bewässerten Pflanzung. Die Vegetation mit der stärksten Wasserversorgung erreichte dabei in 2023 eine maximale Wuchshöhe von durchschnittlich 54 cm (14.09.2023). Zum selben Zeitpunkt weist die Vegetation bei mittlerer Wasserverfügbarkeit einen 5 cm und bei minimaler Wasserverfügbarkeit 6 cm geringeren Wuchs als das maximale Regime auf. Nichtsdestotrotz sind in 2023 keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Regimen festzustellen. Ursache hierfür ist die deutlich bessere Regenwasserversorgung in 2023 (694 mm) gegenüber dem Vorjahr 2022 (473 mm), wodurch die Pflanzen weniger auf eine zusätzliche Bewässerung angewiesen sind. Der sehr trockene September 2023 mit nur 8,8 mm Niederschlag machte sich in der Wuchshöhe nicht bemerkbar.

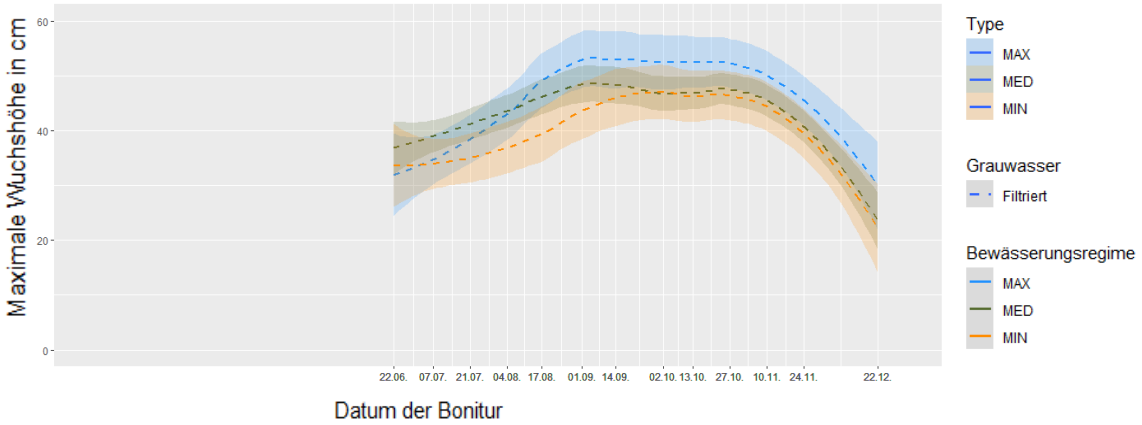


Abbildung 22: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit filtrierter Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2023 (geglättete Werte mit Konfidenzintervall)

In 2024 wurden die Pflanzen aufgrund des Schädlingsbefalls maximal 47 cm hoch und liegen damit 7 cm hinter dem Wert des Vorjahres (Abb. 23). Zu Beginn der Bonituren am 4. März 2024 ist ein 2 cm großer Wachstumsvorteil bei der Vegetation mit der größten

Wasserverfügbarkeit zu beobachten. Während die Differenz in der Wuchshöhe vom minimalen zum medialen Regime im Hochsommer (01.06.-30.09.2023) im Mittel +2,3 cm beträgt, so ist die Differenz zwischen dem medialen und dem maximalen Regime mehr als doppelt so hoch: + 4,7 cm (p-Wert = 0.036, statistisch signifikant). Diese Ergebnisse belegen eine Abhängigkeit der Wuchshöhe von der Bewässerungsmenge. Die Wirkung der Bewässerungsregime lässt sich im Kontext des niederschlagsarmen Sommers 2024 gut beobachten (vgl. Klimadiagramm 2024, Abb. 10).

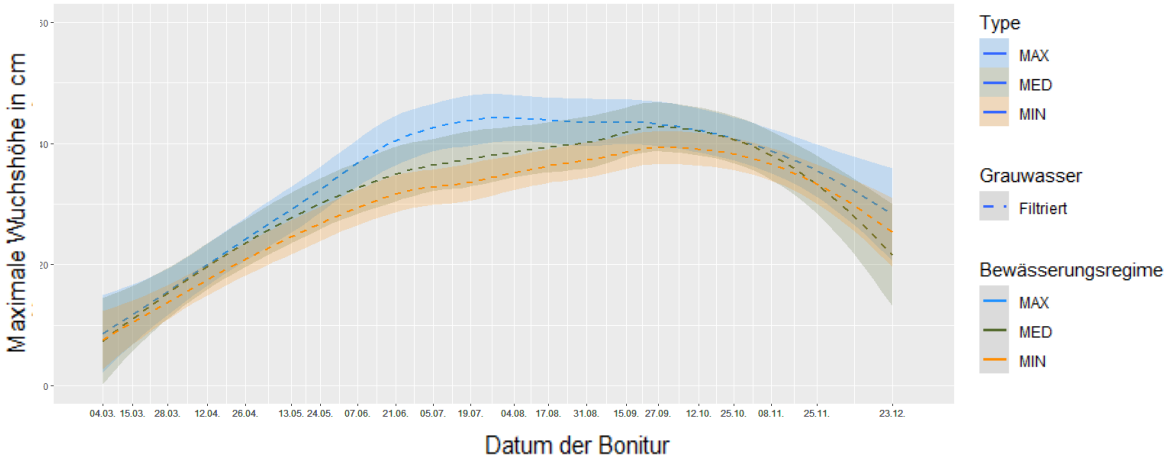


Abbildung 23: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit filtrierter Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2024

<u>Geklärte Grauwasserbewässerung</u>

Auch bei den geklärten Bewässerungsregimen in 2023 und 2024 (Letzteres in Abb. 24) ist ebenso wie im Vorjahr 2022 (Lohaus et al., 2023) eine Korrelation zwischen Bewässerungsmenge und Wuchshöhe zu verzeichnen. In 2023 weisen die Ergebnisse jedoch selbst im Hochsommer (01.06.-30.09.2023) keine statistische Signifikanz auf (ANOVA-Test, p = 0.742). In 2024 beträgt die Differenz in der Wuchshöhe vom minimalen zum medialen Regime im Hochsommer (01.06.-30.09.2023) im Mittel +3,0 cm (statistisch nicht signifikant), während die Differenz zwischen dem medialen und dem maximalen Regime +4,8 cm beträgt (p-Wert = 0.0136, statistisch signifikant). Demnach steigen die erreichten Wuchshöhen, ebenso wie in 2022, erwartungsgemäß nicht linear zu den Bewässerungsmengen, mit denen die Pflanzen versorgt wurden. Während im Jahr 2022 die Unterschiede zwischen medialem und maximalem Regime vergleichsweise gering ausfielen, zeigt sich 2024 ein umgekehrtes Muster: Die Differenz zwischen minimalem und medialem Regime ist gering, während der Zuwachs vom medialen zum maximalen Regime ausgeprägter ist.

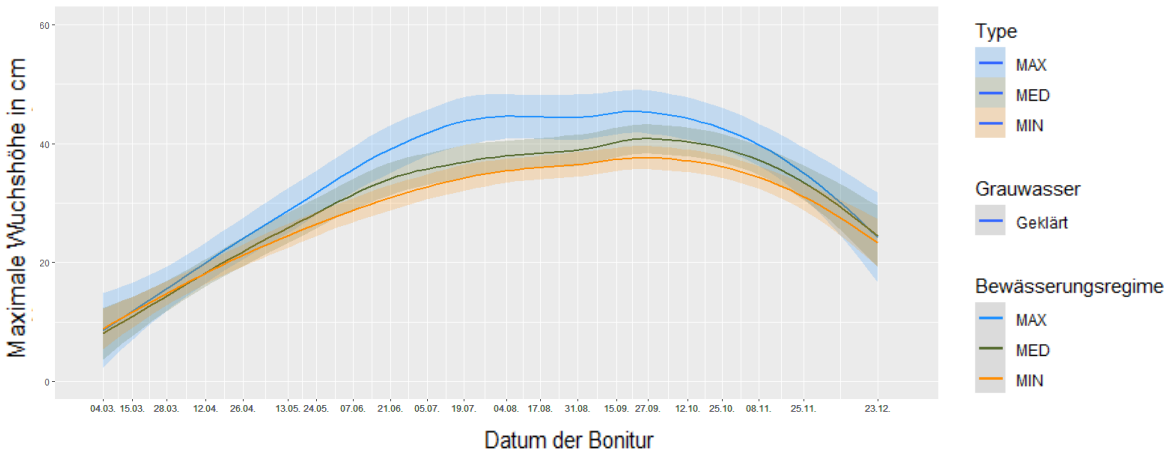


Abbildung 24: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit geklärter Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2024

<u>Vergleich filtrierte und geklärte Grauwasserbewässerung</u>

Bei der Bewässerung mit filtriertem Grauwasser in 2023 zeigen sich Hinweise auf eine höhere Wuchsleistung im Vergleich zur Bewässerung mit geklärtem Grauwasser (Abb. 25). Dieser Effekt kann auf eine höhere Verfügbarkeit von Nährstoffen wie Stickstoff zurückzuführen sein, die bei der Filtration erhalten bleiben, während sie beim Klärprozess stärker reduziert werden. Die Überschneidung der Konfidenzintervalle (Abb. 26) deutet darauf hin, dass jedoch bisher keine signifikanten Unterschiede zwischen der geklärten und filtrierten Bewässerung bei gleicher Bewässerungsintensität zu erwarten sind. Ein gepaarter ANOVA-Test bestätigte diese Vermutung.

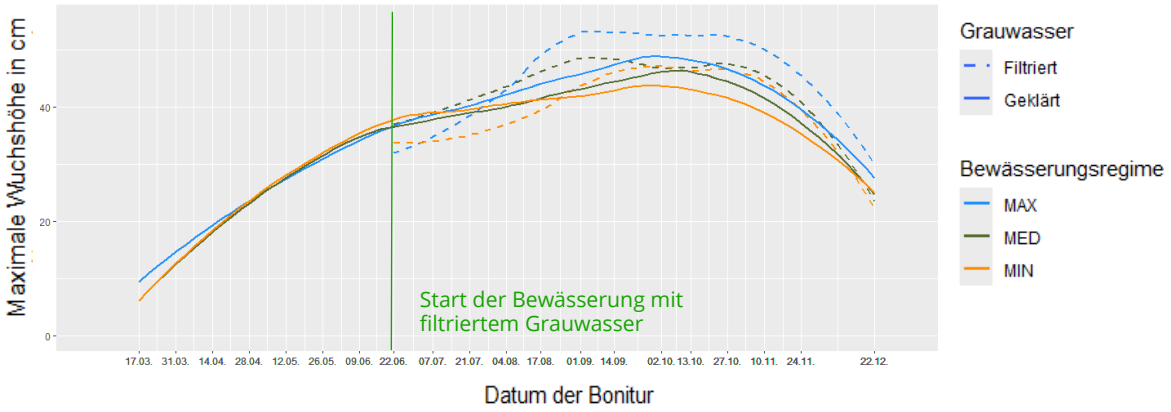
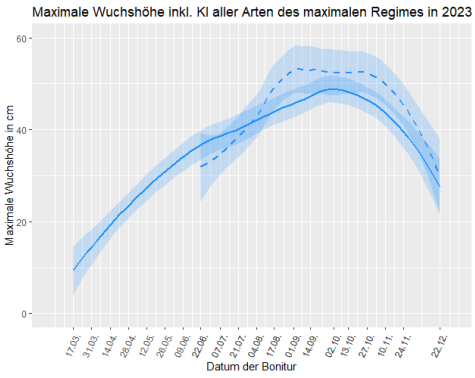
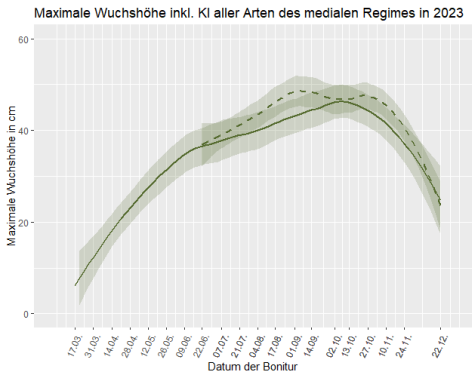


Abbildung 25: Vergleich der mittleren maximalen Wuchshöhe der filtrierten mit der geklärten Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2023





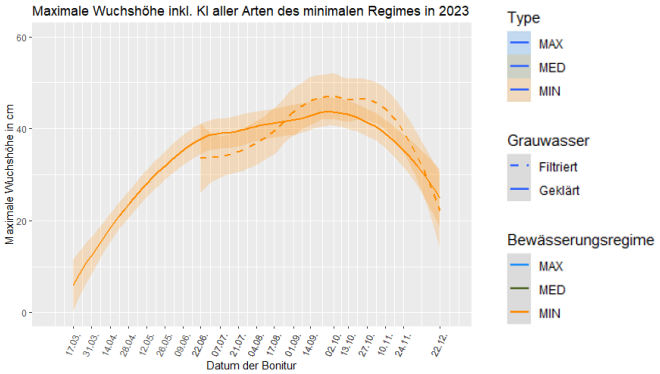


Abbildung 26: Vergleich des maximalen (blau), des medialen (grün) und des minimalen Regimes (orange) einschließlich der Konfidenzintervalle (Type = Konfidenzintervall) der Gruppe 2 in 2023.

In 2024 (Abb. 27) war die Tendenz zu beobachten, dass die Pflanzen gleichermaßen gut bei Bewässerung mit geklärten und filtrierten Grauwasser gedeihen – Signifikante Wachstumsvor- oder -nachteile sind weder durch die Klärung noch die Filtration des Grauwassers erkennbar.

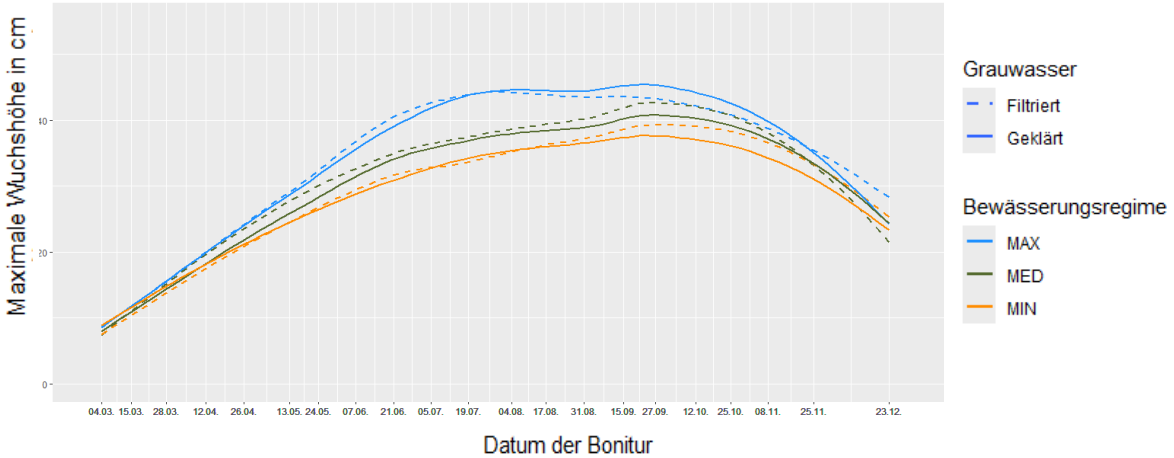


Abbildung 27: Vergleich der mittleren maximalen Wuchshöhe der filtrierten mit der geklärten Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2024.

Individuenzahl

Durch die erstmalige Aufnahme des Parameters „Individuenzahl“ im Juli 2023 in den neuen Boniturbogen, liegt dieser lediglich für 2024 vollständig vor. Da Anfang Juni 2024 Neupflanzungen erfolgten, sind im Folgenden die Veränderungen in der Individuenzahl ab dem 7. Juni abgebildet (Abb. 28). In allen Regimen kommen während der Vegetationsperiode leichte Schwankungen in den Individuenzahlen vor. Vor allem bei der Pflanzung des maximalen Regimes mit geklärter Grauwasserbewässerung waren bis zum 12. Oktober 2024 Ausfälle von bis zu 16 Individuen zu verzeichnen, davon allein neun Individuen der Art Brunnera.

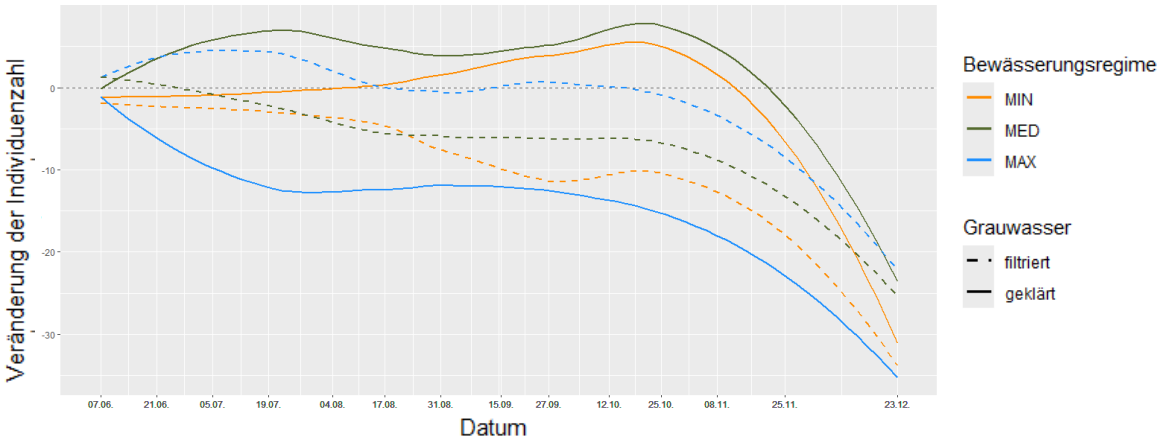


Abbildung 28: Veränderungen in der Individuenzahl seit Neupflanzung am 04. Juni (die darauffolgende Bonitur erfolgte am 07. Juni) bei der filtrierten und geklärten Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2024.

Dieser Artenausfall ist vor allem auf eine Artenverdrängung durch die – insbesondere bei hoher Wasserverfügbarkeit – wuchsstarke Bistorta zurückzuführen (siehe Zeitvergleich der Drohnenbilder in Abb. 29): Im Oktober 2024 ist das 3,5 m² große Forschungsfeld II-7 fast gänzlich von Bistorta bedeckt, sodass andere Arten kaum noch Wachstumschancen besitzen und in ihrer Entwicklung stark gehemmt bzw. verdrängt werden.

Abbildung 29: Exemplarischer Zeitvergleich des Felds II-7 (Maximalbewässerung mit geklärtem Grauwasser); Ausbreitung der Bistorta (rot umrandet) – rechts dominiert die wuchsstarke Bistorta das gesamte Forschungsfeld (Gruppe 2).

Bei einer artspezifischen Betrachtung der Pflanzungen der Gruppe 2 zeigen sich für die Bistorta und die Bergenie weder bei geklärter noch bei filtrierter Grauwasserbewässerung Ausfälle oder Vermehrungen. Sehr leichte Schwankungen der Individuenzahl waren bei der Lysimachia zu beobachten (Vgl. Anhang 3), die auf Beobachtungsunschärfen infolge der sehr dichten Vegetation zurückzuführen sind.

Dementgegen sind bei der Brunnera sowohl in 2023 als auch in 2024 für die Art typische Schwankungen festzustellen (siehe Anhang 4). Besonders in den minimal bewässerten Regimen hat die Art durch den lückigeren Bestand die Chance sich durch Aussaat zu vermehren, was sich in den Individuenzahlen widerspiegelt.

Bei Geranium waren ab Neupflanzung am 04. Juni 2024 einzelne Ausfälle bis hin zu einem kompletten Verlust aller Individuen bei dem medialen Regime unter filtrierter Grauwasserbewässerung zu verzeichnen (Abb. 30 und 31). Ein erneuter Befall mit Dickmaulrüsslerlarven konnte ausgeschlossen werden. Ursache für den Verlust von Geranium ist deren Verdrängung durch die wuchsstarke Bistorta, welche sich insbesondere beim medialen Regime (filtriert) besonders stark ausbreitete. Auffällig ist, dass bei geklärter Grauwasserbewässerung das minimale gefolgt vom medialen Regime die meisten Geranium aufweist. Der Grund liegt auch hier (ähnlich wie bei der Brunnera) darin, dass sich die Art bei einem tendenziell lückigeren Bestand besser durchsetzen kann und weniger verdrängt wird. Bei der vorhandenen Artenauswahl des Gründaches ist Geranium demnach weniger konkurrenzstark gegenüber Arten wie die Bistorta, die auf eine erhöhte Wasserversorgung besonders wuchsstark reagieren. Inwiefern zusätzlich die Art des Grauwassers zum Artverlust beiträgt, sollte im Rahmen weiterer Untersuchungen gezielt überprüft werden.

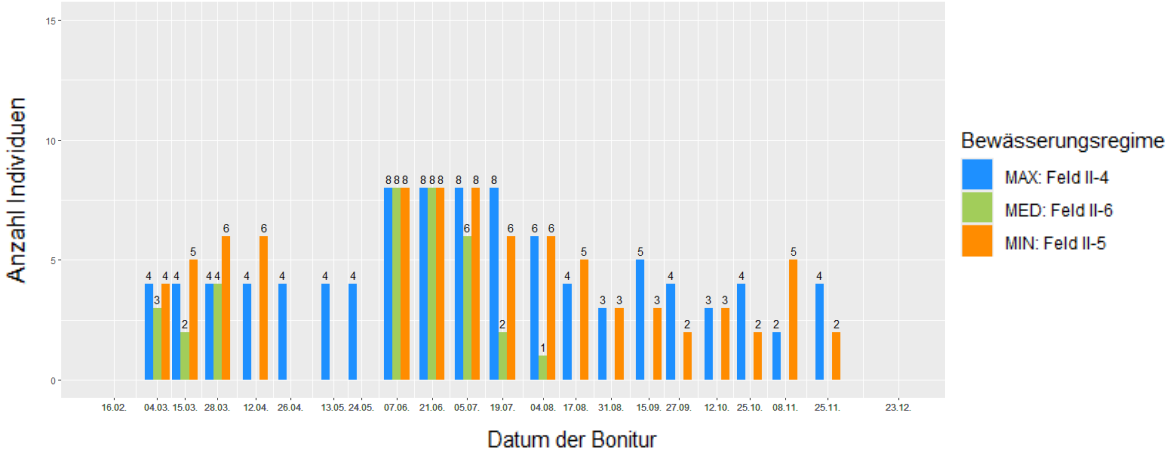


Abbildung 30: Individuenzahl von Geranium bei der filtrierten Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2024.

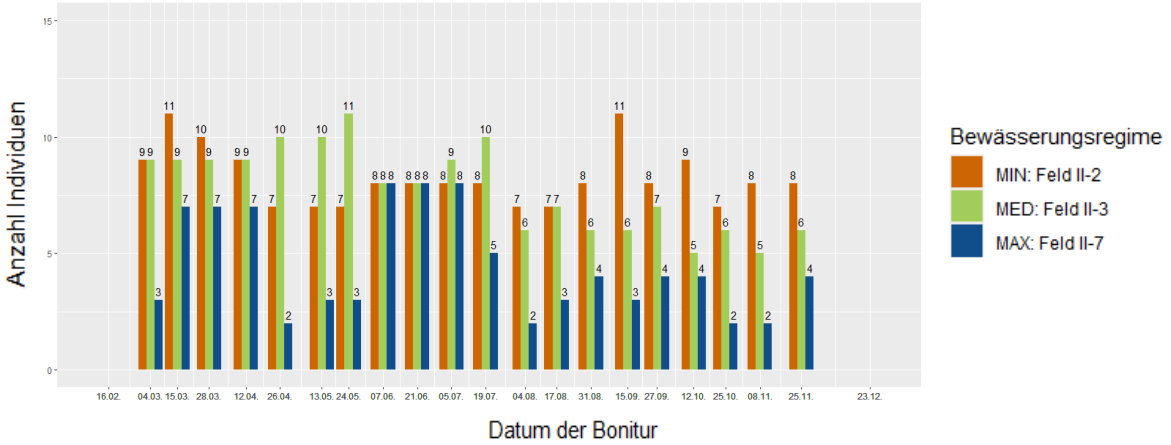


Abbildung 31: Individuenzahl von Geranium bei der geklärten Grauwasserbewässerung der Gruppe 2 in 2024.

Blühende Individuen

Die Verwendung von filtriertem Grauwasser und damit der Verzicht auf die Klärung des Grauwassers durch die Pflanzenkläranlage führte im Frühjahr 2024 bei Betrachtung der

Häufigkeit tendenziell zu einem höheren Anteil blühender Individuen (Abb. 32). Trotz der festgestellten Tendenz sind die Unterschiede statistisch nicht signifikant (siehe Anhang 5). Eine größere Anzahl an Testfeldern pro Bewässerungsregime wäre erforderlich, um die Ergebnisse mit ausreichender statistischer Präzision zu validieren und aussagekräftigere Schlussfolgerungen zu ziehen.

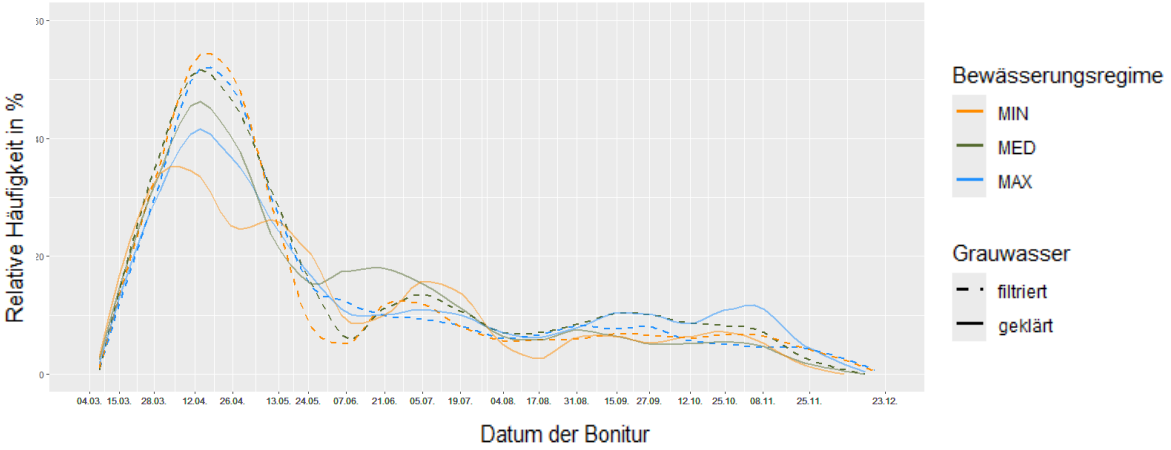


Abbildung 32: Relative Häufigkeit blühender Individuen an dessen Gesamtzahl für das filtrierte Regime (gestrichelte Linien) sowie das geklärte Regime (durchgezogene Linien) für die Bewässerungsregime (Minimal, Medial, Maximal) der Gruppe 2 in 2024.

Die Blühdauer der früh blühenden Arten Brunnera und Bergenia sind arttypisch, da zu diesem Zeitpunkt noch keine außergewöhnlichen klimatischen Bedingungen vorherrschen und sich die Blüten ungestört entwickeln können (absolute Anzahl blühender Individuen siehe Abbildung 33). Die besonders hohe Menge blühender Brunnera bei MIN (filtriert) von bis zu 15 Individuen am 12. April 2024 im Vergleich zu 10 bzw. 11 Individuen bei MED und MAX (filtriert) liegt an der stärkeren Vermehrung der Art bei einem lückigeren Bestand bedingt durch die geringere Bewässerungsmenge. Die geringere Anzahl an Brunnera bei MIN (geklärt) ist auf den höheren Bedeckungsgrad in diesem Feld zurückzuführen. Demnach bewirkte bei der Brunnera ein erhöhtes Wasserangebot nicht zwangsläufig zu einer größeren Anzahl blühender Individuen.

Die Bergenien, welche im Frühjahr 2024 Fraßspuren des Dickmaulrüsslers aufwiesen, blühten nichtsdestotrotz von Mitte März bis Ende April in allen Bewässerungsregimen. Die Nematodenbehandlung erfolgte erst am Ende ihrer Blütezeit am 25. April 2024. Für Bergenie ist es durchaus typisch bei optimalen Verhältnissen ein zweites Mal im Herbst zu blühen. In 2024 ist jedoch eine Nachblüte für alle Regime ausgeblieben.

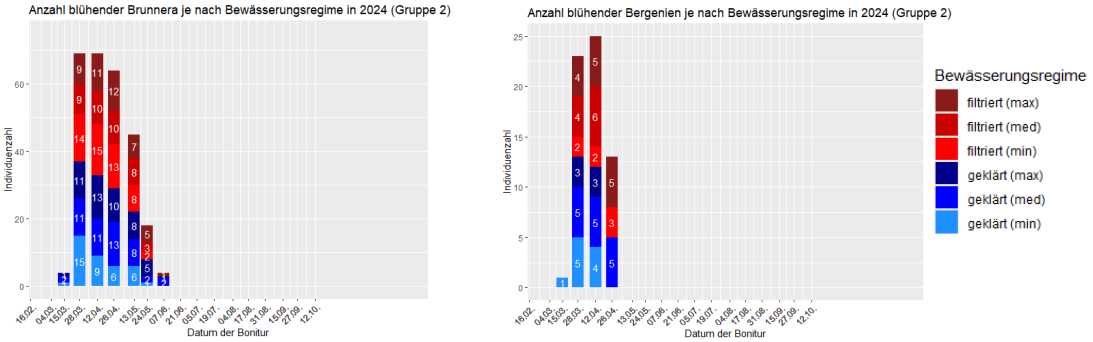


Abbildung 33: Absolute Häufigkeit der Frühblüher Brunnera und Bergenia der Gruppe 2 in 2024.

Die Lysimachia (Abb. 34 links) zeigt ein arttypisches Blühverhalten mit einer Konzentration der Blüte im Juni bis Juli. Anders als bei der Brunnera und Bergenie gibt es bei der absoluten Anzahl eine leichte Tendenz, dass das geklärte Grauwasser mehr blühende Individuen hervorruft.

Bei Geranium (Abb. 34 rechts) zeigt sich ein gegensätzliches Bild, bedingt durch die schwankenden Individuenzahlen. Insbesondere das Geranium in den Forschungsfeldern mit der filtrierten Grauwasserbewässerung wurden im minimalen und medialen Regime durch die Bistorta verdrängt und hatten infolge dessen einen gänzlichen Artenausfall zu verzeichnen, wodurch keine Blütenbildung möglich ist. Gleiches gilt für die Felder, die mit geklärtem Grauwasser beschickt wurden: Insbesondere im maximalen Regime war eine Artverdrängung zu verzeichnen. Aus diesem Grund sind die meisten blühenden Geranium-Individuen im minimalen Regime zu finden. Verlässliche Aussagen zur Blütenbildung in Abhängigkeit von Bewässerungsintensität und Art des Grauwassers (geklärt/filtriert) sind hier nicht möglich.

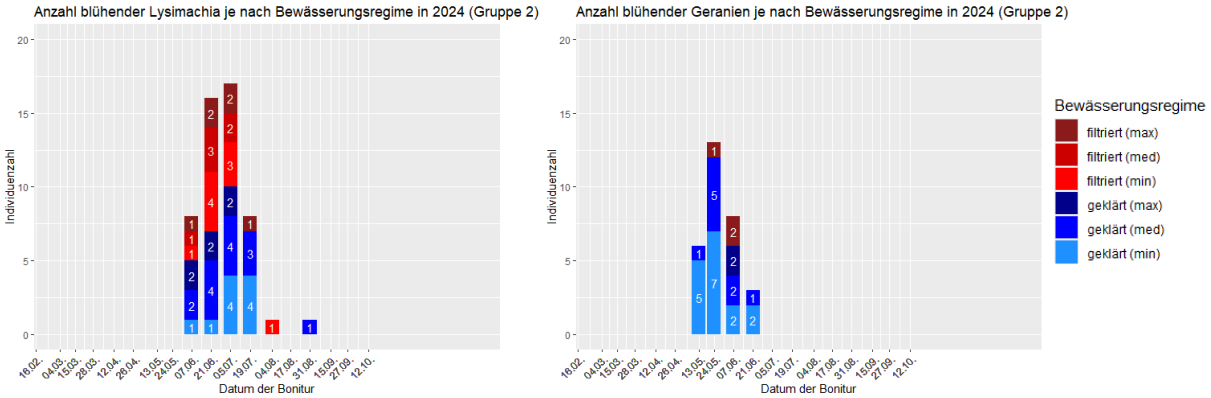


Abbildung 34: Absolute Häufigkeit der im Sommer blühenden Arten Lysimachia und Geranium der Gruppe 2

Bei der spät blühenden Art Bistorta (Abb. 35), deren Blühphase tendenziell in die Monate mit geringen Niederschlägen und höheren Temperaturen fällt, sind keine signifikanten Unterschiede in der Blütenbildung zwischen den Bewässerungsregimen zu erkennen. Bistorta, die mit filtriertem Grauwasser bewässert wurden, blühten bereits eine Bonitur eher. Unabhängig von der Bewässerungsintensität sowie der Art des verwendeten Grauwassers (geklärt oder filtriert) blühten alle Individuen bei der Bonitur am 5. Juli 2024.

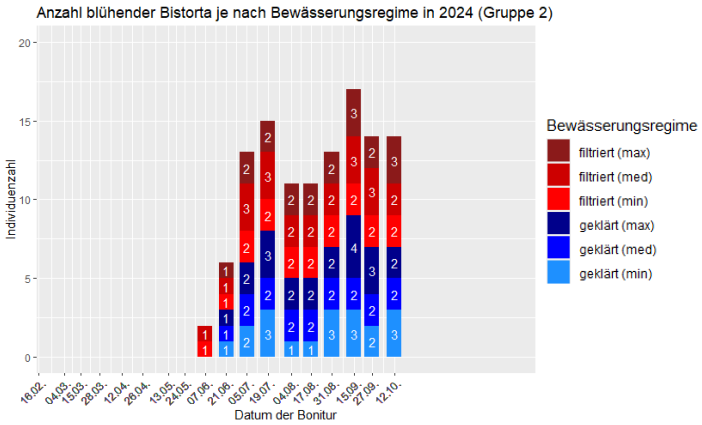


Abbildung 35: Absolute Häufigkeit der spät blühenden Art Bistorta der Gruppe 2

Deckungsgrad

Trotz der im Vergleich zum Vorjahr 2022 höheren Niederschläge im Jahr 2023 lässt sich, wenn auch weniger ausgeprägt, tendenziell eine positive Wirkung einer erhöhten Bewässerungsmenge auf den Bedeckungsgrad feststellen. Die Pflanzungen mit der größten Wasserverfügbarkeit weisen im Hochsommer die höchsten Deckungsgrade auf, wobei die Bedeckung bei filtrierter Bewässerung höher ausfällt als bei geklärter Bewässerung (Abb. 36). Letzteres gilt ebenso für die medialen Bewässerungsregime. Während der Hitzeperiode, Mitte Juli 2023, sind die Differenzen bei den Regimen mit filtrierter Grauwasserbewässerung besonders groß: Das medial bewässerte Feld liegt mit einer Bedeckung von 85 % zu diesem Zeitpunkt 7 % hinter dem maximalen Regime (mit einer Bedeckung von 92 %) und 5 % vor dem minimalen Regime (mit einer Bedeckung von 80 % am 17.07.2023). Bei der Bewässerung mit geklärtem Grauwasser liegen die Regime MIN (82 %) und MED (80 %) zum selben Zeitpunkt auf vergleichbarem Niveau, während MAX mit 88 % deutlich höhere Bedeckungswerte erreicht. Ursache für den vergleichsweise hohen Bedeckungsgrad bei minimaler Bewässerung mit geklärtem Grauwasser kann die hohe Individuenzahl (3 Individuen mehr als MED und 11 mehr als MAX) sein, insbesondere von Brunnera. Diese Art profitiert von lückigeren Beständen, indem sich die Individuen unter solchen Bedingungen verstärkt ausbreiten und somit maßgeblich zum höheren Deckungsgrad beitragen. Im vergleichsweise trockeneren Jahr 2022 lagen die Deckungsgrade am 05. August 2022 bei Bewässerung mit geklärtem Grauwasser im MAX-Regime auf einem ähnlich hohen Niveau wie im Jahr 2023 (Differenz von +2 %). Im MED-Regime wurde hingegen ein um 8 % niedrigerer Deckungsgrad erreicht (72 %), während im MIN-Regime ein deutlich geringerer Wert verzeichnet wurde – hier lag der Deckungsgrad um 30 % unter dem entsprechenden Vergleichswert des Jahres 2023. Diese Ergebnisse verdeutlichen die positiven Effekte und damit den Bedarf einer zusätzlichen Bewässerung besonders in trockenen Jahren bzw. Sommern.

Die Differenzen zwischen den mit geklärtem und den mit filtriertem Grauwasser bewässerten Pflanzungen sind auf die unterschiedliche Nährstoffzusammensetzung des filtrierten Grauwassers zurückzuführen. Gegen Ende des Jahres werden dennoch nahezu

identische Maximalwerte erreicht: Sowohl im MAX-Regime unter filtrierter als auch unter geklärter Bewässerung beträgt der Bedeckungsgrad 99 %, während im MED-Regime unter filtrierter Bewässerung ein vollständiger Bedeckungsgrad von 100 % erzielt wird. Auch die minimal bewässerten Flächen weisen am 4. September 2023 hohe Bedeckungsgrade von 94–95 % auf, wobei das MIN-Regime unter geklärter Bewässerung mit 94 % den Bedeckungsgrad des entsprechenden MED-Regimes (93 %) übertrifft.

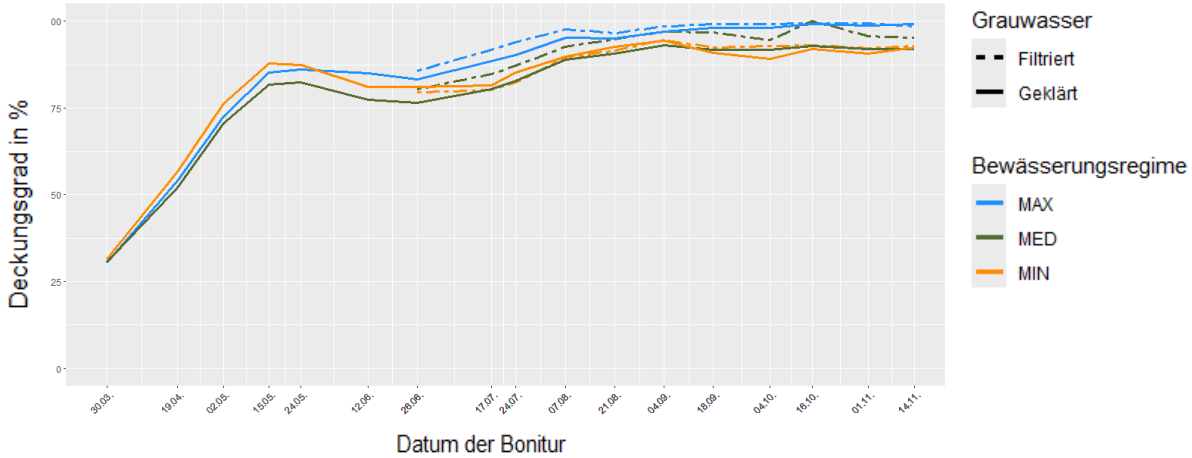


Abbildung 36: Mittlere Deckungsgrade aller Arten der Gruppe 2 in 2023 bei geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung.

In 2024 lässt sich die bessere Performance der filtrierten gegenüber der geklärten Grauwasserbewässerung, wie es in 2023 tendenziell der Fall war, nicht bestätigen (Abb. 37, oben). Bei Betrachtung der filtrierten Grauwasserbewässerung zeigen die unterschiedlichen Bewässerungsregime einen deutlichen Einfluss auf den Deckungsgrad (Abb. 37, unten rechts). Während das maximale Regime über den gesamten Zeitraum die höchsten Werte (im Maximum eine vollständige Bedeckung von 100 % am 22.08.2024) erreicht, weist das minimale Regime eine deutlich langsamere Zunahme und einen geringeren Bedeckungsgrad (im Maximum 93 % am 14.10.2024) gegen Ende des Untersuchungszeitraums auf. Dabei sind zwischen dem medialen und maximalen Regime mit einer mittleren Differenz von 4 % keine signifikanten Unterschiede in der Bedeckung feststellbar. Dahingegen unterscheidet sich das minimale vom medialen Regime um im Mittel 10 % sichtbar stärker voneinander. Die Drohnenaufnahmen in der Tabelle 5 zeigen die Vegetationsbedeckungen am 5. August 2024, einem Zeitpunkt in dem sich die Regime am stärksten voneinander unterschieden, im Vergleich zum Frühjahr.

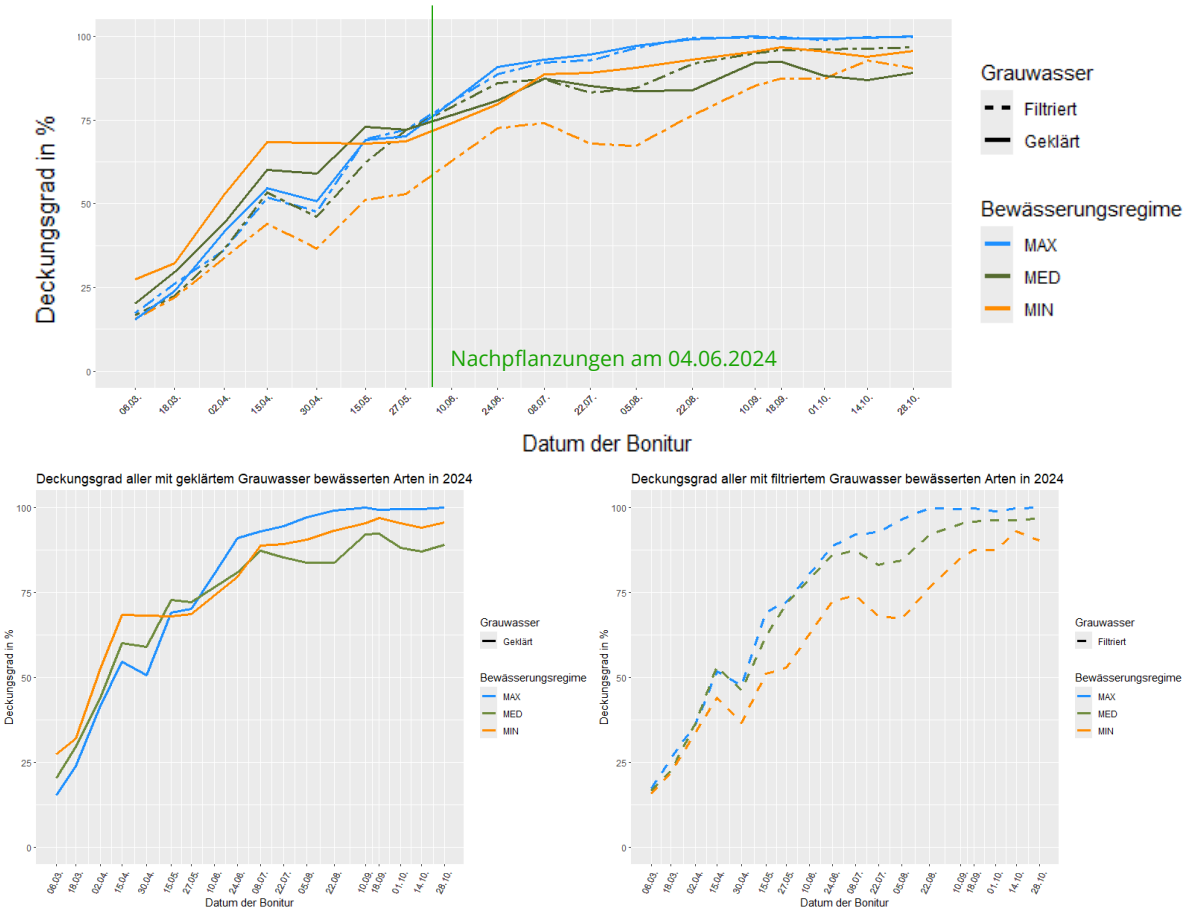


Abbildung 37: Mittlere Deckungsgrade aller Arten (geklärte und filtrierte Grauwasserbewässerung) der Gruppe 2 in 2024 (oben) sowie darunter einzeln die geklärte Bewässerung (links) und die filtrierte Bewässerung (rechts).

Tabelle 5: UAV-Aufnahmen inkl. Deckungsgrade der Felder mit filtrierter Grauwasserbewässerung zu zwei verschiedenen Zeitpunkten in 2024 (Gruppe 2)

15.05.2024			05.08.2024		
MAX	**MED**	**MIN**	**MAX**	**MED**	**MIN**
69 %	62 %	51 %	97 %	85 %	67 %

Innerhalb der geklärten Grauwasserbewässerung (Abb. 37, unten links) der Gruppe 2 sind die Unterschiede zwischen den Regimen weniger stark ausgeprägt. Zwar zeigt das maximale Regime auch hier eine tendenziell höhere Deckung (im Maximum 100 % am 10.09.2024), jedoch weist, wie teils in 2023, das minimale Regime einen höheren Deckungsgrad (im Maximum 97 % am 18.09.2024) auf als das medial bewässerte Feld (im Maximum 92 % am 22.08.2024) bei geklärter Grauwasserbewässerung. Am 22. August 2024 sind die Unterschiede zwischen den Regimen besonders deutlich ausgeprägt: Die Tabelle 6 zeigt die Drohnenaufnahmen mit den dazugehörigen Deckungsgraden für die Felder mit geklärter Grauwasserbewässerung. Im maximalen Bewässerungsregime

dominiert nahezu ausschließlich Bistorta, die durch ihr starkes Wachstum andere Arten weitgehend überwuchert. Im medialen und minimalen Regime hingegen zeigt Bistorta in Abhängigkeit von der jeweiligen Bewässerungsintensität einen deutlich reduzierten Wuchs. Im minimalen Regime, das den zweithöchsten Deckungsgrad erreicht, konnte insbesondere Geranium die entstandenen Lücken erfolgreich schließen, da die Art aufgrund der geringeren Konkurrenz durch Bistorta ihren vollen Wuchs entfalten konnten.

Tabelle 6: UAV-Aufnahmen inkl. Deckungsgrade der Felder mit geklärter Grauwasserbewässerung in 2024 (Gruppe 2).

22.08.2024		
MAX	**MED**	**MIN**
99 %	84 %	93 %

Der Vergleich zwischen geklärtem und filtriertem Grauwasser zeigt insgesamt ähnliche Verläufe der Regime. Eine Ausnahme bildet das minimale Regime unter geklärter Grauwasserbewässerung, das einen vergleichsweise sehr hohen Deckungsgrad aufweist und nahezu an die Werte des maximalen Regimes heranreicht (Drohnenaufnahmen siehe Tabelle 7). Die Abweichung lässt sich insbesondere darauf zurückführen, dass im MIN-Regime mit geklärtem Grauwasser überwiegend etabliertes Geranium (7 von 8; 1 Neupflanzung) vorhanden ist, das bereits einen deutlich weiter entwickelten Wuchs aufweist. Im Gegensatz dazu bestehen die Bestände im MIN-Regime mit filtriertem Grauwasser ausschließlich aus neu gepflanztem Geranium (8 von 8), deren Entwicklung noch am Anfang steht. Ende Juli trat bei MIN (filtriert) aufgrund von Konkurrenz erneut ein Verlust des neu gepflanzten Geraniums auf, was sich im Deckungsgrad widerspiegelt (Vergleich Kapitel Individuenzahl, Seite 51).

Tabelle 7: UAV-Aufnahmen inkl. Deckungsgrade der Felder des minimalen Regimes (Gruppe 2) in 2024.

	MIN (geklärt)	**%**	**MIN (filtriert)**	**%**
15.04.2024 Vor Neupflanzung		69 %		44 %
24.06.2024 Nach Neupflanzung		80 %		73 %

22.07.2024 Im Hochsommer		89 %		68 %

Blattmenge, -größe und -gesundheit

Die Blattmenge, -größe und -gesundheit der Pflanzen wurde auf einer 9-stufigen Skala nach der Tabelle 8 bewertet

Tabelle 8: Skala Blattanzahl (links), Skala Blattgröße (mittig) und Skala Blattgesundheit (rechts); analog zu Tabelle 3 für Gruppe 1

Skala	Blattanzahl
1	Keine
2	
3	Wenige
4	
5	Normal viele
6	
7	Zahlreiche
8	
9	Sehr viele

Skala	Blattgröße
1	Sehr klein
2	
3	Klein
4	
5	Normal groß
6	
7	groß
8	
9	Sehr groß

Skala	Blattgesundheit
1	Krank
2	
3	Wenig gesund
4	
5	Mäßig gesund
6	
7	Gesund
8	
9	Sehr gesund

<u>Blattmenge</u>

Die Blattmenge (Abb. 38) weist in 2024 in allen Regimen unabhängig von der Grauwasserart (geklärt / filtriert) äußerst ähnliche Werte auf und zeigte nicht, wie in 2022, die erwartete Abstufung der Blattanzahl entsprechend ihrer Bewässerungsmenge. In 2022 sind deutlich höhere Werte erreicht worden: Im Sommer lagen die Bewertungen durchgängig oberhalb von Stufe 5, selbst im minimalen Regime. Zudem führten höhere Bewässerungsmengen in 2022 zu einer jeweils um eine Stufe verbesserten Bewertung. In 2024 hingegen schwankten die Bewertungen um Stufe 5, was einer für die Arten normalen Blattanzahl entspricht.

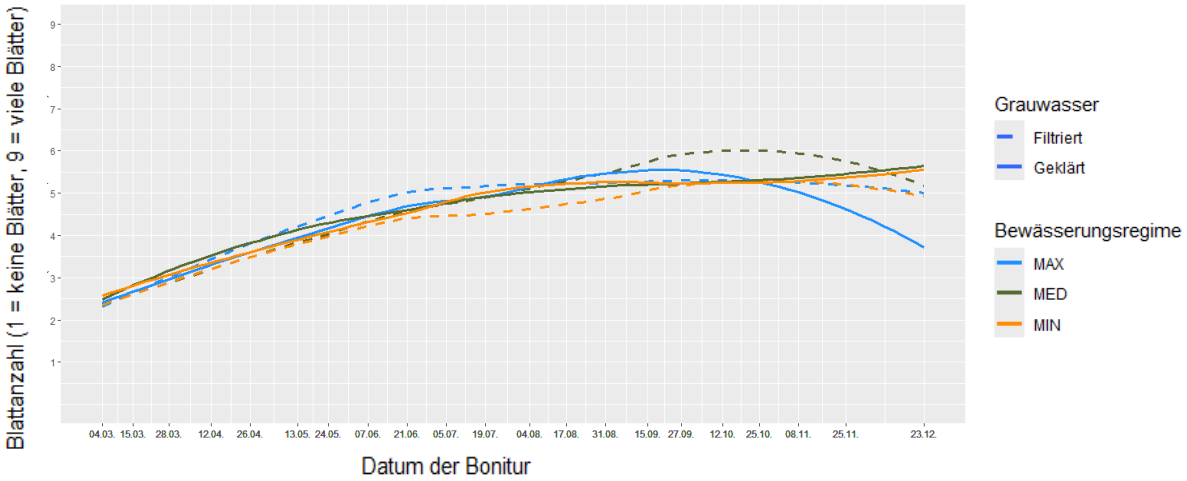


Abbildung 38: Mittlere Blattmenge aller Arten der Gruppe 2 in 2024.

Eine differenzierte Betrachtung auf Art-Ebene zeigt teils deutlichere Unterschiede. Bei Bistorta traten auffällige Differenzen zwischen den Bewässerungsregimen auf (siehe Abb. 39, links). Diese Art bildete bei hoher Wasserverfügbarkeit signifikant mehr Blätter aus: Im maximalen Regime erreichte Bistorta im Zeitraum von Sommer bis Herbst Bewertungen, die bis zu vier Stufen über denen des minimalen Regimes und bis zu drei Stufen über denen des medialen Regimes lagen (bei filtrierter Grauwasserbewässerung). Zudem war Bistorta die einzige Art, die die höchste Bewertungsstufe 9 (sehr viele Blätter) erreichte.

Demgegenüber verhielten sich die Bergenie und Brunnera hinsichtlich der Blattmenge indifferent gegenüber der Bewässerungsintensität. Es sind weder Auffälligkeiten hinsichtlich verschiedener Bewässerungsmengen noch bei den Grauwasserarten (geklärt / filtriert) erkennbar.

Bei Lysimachia (Abb. 39, rechts) und Geranium (Abb. 39, mittig) zeigte sich eine auffällige Abweichung vom erwarteten Muster: Beide Arten erreichten i. d. R. maximal eine durchschnittliche Blattmenge. Auffallend ist zudem, dass die Reaktion auf die unterschiedlichen Bewässerungsregime den Erwartungen widersprach: Eine maximale Wasserzufuhr führte nicht zu einer Steigerung der Blattbildung. Der Grund liegt auch in der teilweisen Verdrängung der beiden Arten durch die konkurrenzstarke Bistorta. Diese Art entwickelt insbesondere bei hoher Wasserverfügbarkeit ein ausgeprägtes Wachstum, wodurch sie andere Arten überwucherte und demnach ihr Blattwachstum einschränkte.

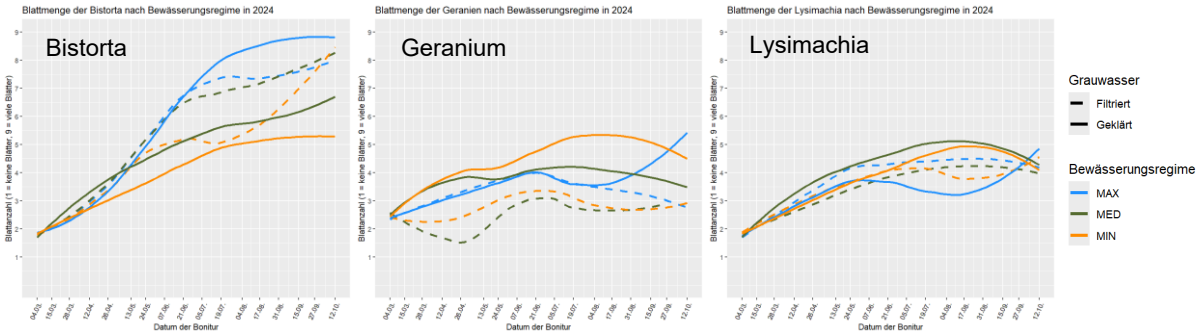


Abbildung 39: Mittlere Blattmengen für die Arten Bistorta (links), Geranium (mittig) und Lysimachia (rechts) der Gruppe 2 in 2024.

<u>Blattgröße</u>

Ähnlich wie bei der Blattmenge zeigt sich auch bei der Blattgröße kein signifikanter Unterschied in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität und der Art des Grauwassers (geklärt / filtriert). In Abbildung 40 lässt sich jedoch eine Tendenz erkennen, dass eine intensivere Bewässerung insbesondere im Hochsommer zu einer Entwicklung größerer Blätter führt. Lediglich das minimale Regime (filtriert) und das maximale Regime (filtriert) unterscheiden sich mit einer Stufe Unterschied zueinander. Die Werte der übrigen Regime liegen näher beieinander. In 2022 führten häufigere Wassergaben zu einer besseren Entwicklung der Blätter bzw. zu einer jeweils um eine Stufe verbesserten Bewertung. Grund hierfür können die deutlich trockeneren Verhältnisse insbesondere in

der Hauptwachstumsperiode von April bis Juni im Jahr 2022 (83 mm Niederschlag) im Vergleich zu 2024 (124 mm) sein. Dadurch sind die Pflanzungen bei geringem Niederschlag mehr von einer zusätzlichen Bewässerung abhängig, was sich in deren Vitalität widerspiegelt.

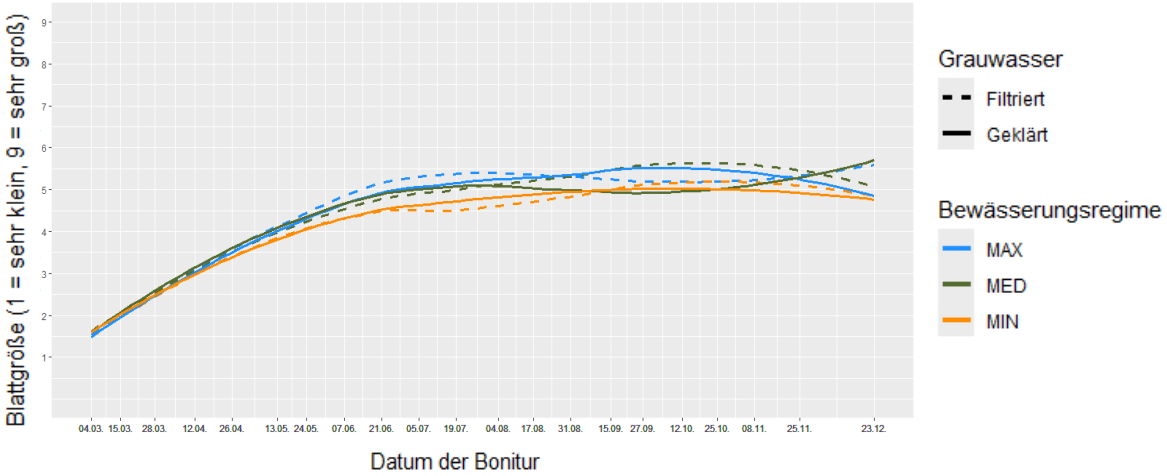


Abbildung 40: Mittlere Blattgrößen aller Arten der Gruppe 2 in 2024.

Bei der artspezifischen Betrachtung fällt analog zu Blattmenge alleinig bei der Bistorta eine starke Abhängigkeit der Blattgröße von der Bewässerungsintensität auf (Abb. 41). Die Art zeigt beim maximalen Regime mit geklärtem Grauwasser die größten Blätter (Stufe 7,2 = groß am 05.07.2024); die Blätter des medialen Regimes werden über eine Stufe kleiner bewertet (Stufe 5,9 = normal große bis große Blätter) sowie die des minimalen Regimes ebenso über eine Stufe kleiner (Stufe 4,7 = normal große Blätter) als das mediale Regime (geklärt). Die Blattgrößen bei filtrierter Grauwasserbewässerung weisen keine signifikant kleineren oder größeren Blätter im Vergleich zum geklärten Grauwasser auf.

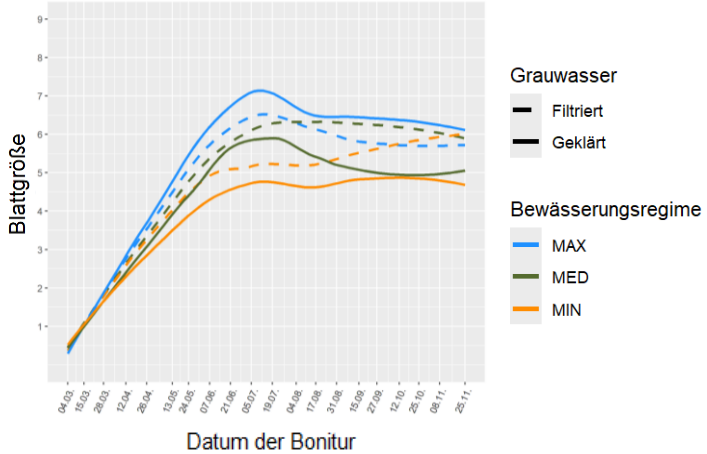


Abbildung 41: Mittlere Blattgrößen der Bistorta der Gruppe 2 in 2024.

Die Blattgrößen der übrigen Arten (Bergenie, Brunnera, Geranium und Lysimachia) zeigen keine eindeutigen Unterschiede zwischen den Regimen entsprechend ihrer Bewässerungsmengen. Ein Einfluss der Bistorta auf diese Ergebnisse, bedingt durch ihren starken Wuchs, ist nicht auszuschließen. Ebenso werden keine eindeutigen Unterschiede

zwischen der geklärten und der filtrierten Grauwasser verzeichnet, was auf eine gute Verträglichkeit beider Grauwasserarten hindeutet.

Blattgesundheit

Die beobachteten Unterschiede in der Blattgesundheit zwischen den verschiedenen Bewässerungsregimen sind gering und liegen bei weniger als einer Stufe (Abb. 42). Die Bewertungen auf der 9-stufigen Skala variieren zwischen 4,4 und 6,5, was einen Zustand von „mäßig gesund“ bis „gesund“ widerspiegelt. In allen Regimen wurde die Blattgesundheit zu Beginn der Vegetationsperiode am höchsten bewertet (Stufe 6,5), während sie im Verlauf der Sommermonate tendenziell abnahm, mit Werten zwischen 4,4 und 5,2. Im Hochsommer erzielte das maximale Bewässerungsregime die besten Bewertungen, wobei der Unterschied im Vergleich zu den anderen Regimen jedoch minimal blieb. Auch im Untersuchungsjahr 2022 (Lohaus et al., 2023) waren die Unterschiede der Wertungen zum jeweils niedrigeren Regime bei der Betrachtung der Mittelwerte größtenteils niedrig (< 1 Stufe).

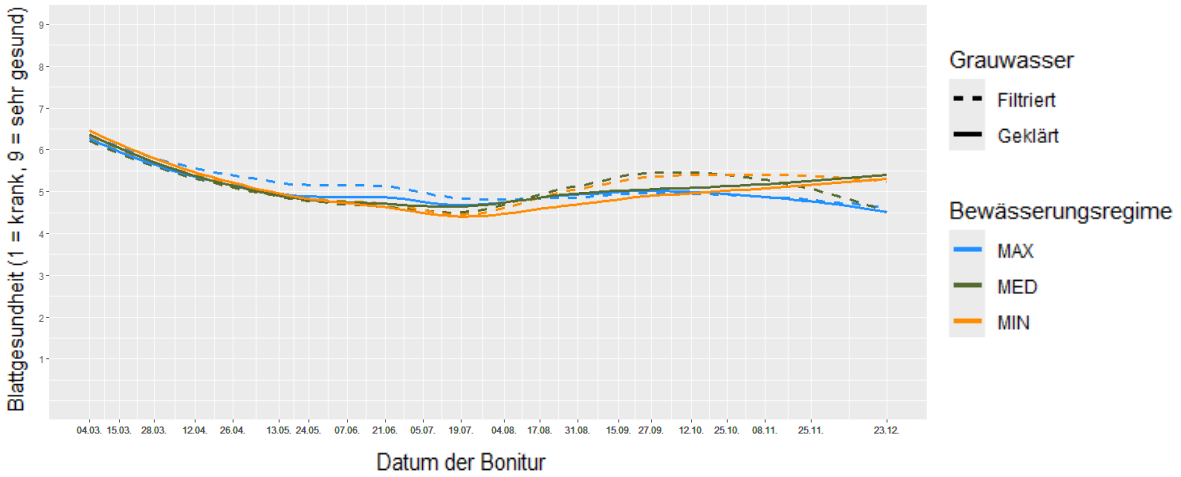


Abbildung 42: Mittlere Blattgesundheit aller Arten der Gruppe 2 in 2024.

Insbesondere bei Brunnera, Lysimachia und Geranium wurde eine markante Abnahme der Blattgesundheit während der Sommermonate festgestellt, wobei dieser Rückgang unabhängig von der Art und Menge des verwendeten Grauwassers auftrat. Bei Geranium sind darüber hinaus teils starke Schwankungen in der Blattgesundheit zu verzeichnen. Auch die Bistorta zeigte schwankende Werte in Bezug auf die Blattgesundheit. Als einzige Art wies die Bergenie über die gesamte Vegetationsperiode hinweg in allen Bewässerungsregimen einen positiven Gesundheitstrend auf; es ist erkennbar, dass sich die Art von den Fraßspuren des Dickmaulrüsslers erholen konnte.

4.3.4 Gruppe 3: Einfluss Wasserdargebots und Art des Grauwassers auf Vitalität

Bei den Forschungsfeldern der Gruppe 3, die eine andere Artenzusammensetzung zu Gruppe 1 und 2 aufweist, kann zusätzlich das unbewässerte Referenzfeld mit gleicher Artenauswahl herangezogen werden, um die Vitalität der Pflanzungen zu vergleichen. Da die Flächen der Gruppe 3 im Jahr 2023 vollständig neu bepflanzt und daher erstmalig untersucht wurden, erfolgt in den nachfolgenden Unterkapiteln zusätzlich eine detaillierte Auswertung jeder einzelnen Art.

Die Gruppe 3 wird jahreszeiten- und tageszeitenabhängig unterschiedlich stark von umliegenden Gehölzen sowie dem Verwaltungsgebäude verschattet. Die Abbildungen 43a und b zeigen beispielhaft für Juli, dass die Felder 1 bis 4 von den umliegenden Gehölzen in den heißen Nachmittags- bis Abendstunden verschattet werden. In den Ergebnissen ist zu sehen, dass diese Felder von den milderen Temperaturen profitieren. Die Felder 5 bis 8 sind demnach einer höheren Besonnung als die übrigen Felder der Gruppe 3 ausgesetzt. Darüber hinaus werden die Felder 7 und 8 in den Morgenstunden (ca. 9:00) teils kurzzeitig vom Gebäude verschattet – diese Auswirkungen sind jedoch als gering einzustufen und finden daher keine weitere Beachtung. Aufgrund der variierenden Verschattung durch die Gehölze unterliegen die Forschungsfelder teils sehr unterschiedlichen mikroklimatischen Standortbedingungen. Diese wirken sich wesentlich auf die Pflanzenentwicklung aus und müssen bei der Interpretation der Ergebnisse zwingend berücksichtigt werden. Eine direkte Vergleichbarkeit ist daher theoretisch nur zwischen Feld 1 (geklärtes Grauwasser) und 4 (filtriertes Grauwasser) des minimalen Regimes möglich.

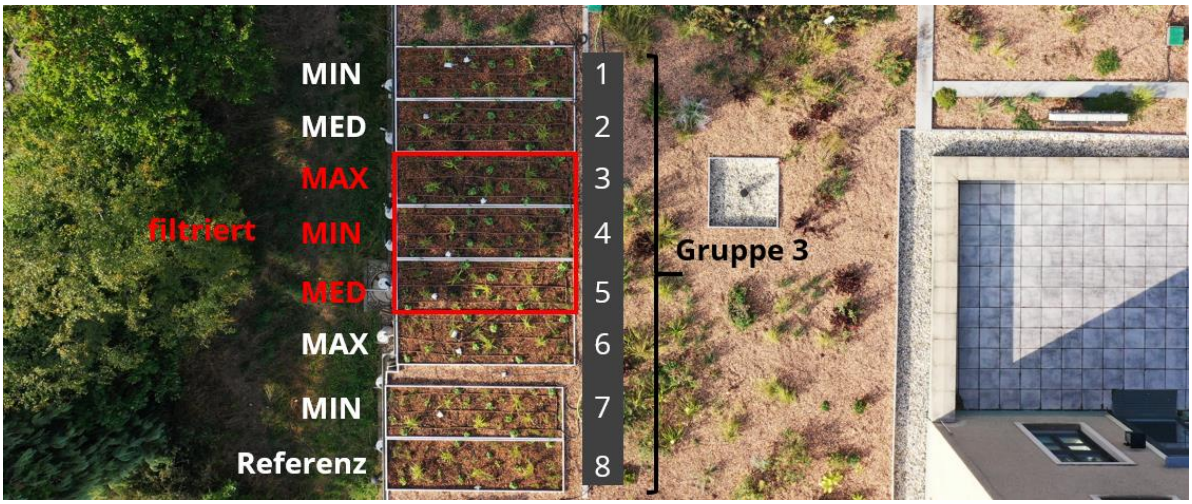


Abbildung 43a: Schattenwurf auf die Gruppe 3: Drohnenaufnahme vom 24. Juli 2023 um 18:00.

Abbildung 43b: Schattenwurf auf die Gruppe 3: Schattendiagramm aus 3D-Modell mit Sonnenverlauf für Dresden am 30. Juli um 9:00 (unten links), 12:00 (unten mittig) und 18:00 (unten rechts).

Wuchshöhe

Filtrierte Bewässerung:

Analog zu den Pflanzungen der Gruppe 2 sind bei der filtrierten Grauwasserbewässerung in den Jahren 2023 und 2024 keine Auffälligkeiten festzustellen. Im ersten Vegetationsjahr 2023 liegen die maximalen Wuchshöhen aller Regime noch recht nah beieinander: Die Pflanzen des maximalen Regimes sind unter filtrierter Grauwasserbewässerung im Mittel 1,0 cm höher als die des medialen Regimes und 2,3 cm größer als die des minimalen Regimes (Abb. 44). Die bewässerten Pflanzungen zeigen jedoch einen sichtlichen Wachstumsvorteil zum unbewässerten Feld. Selbst die Vegetation unter Minimalbewässerung weist eine im Mittel 3,7 cm größere Maximalwuchshöhe im Vergleich zum unbewässerten Feld auf. Die Vegetation mit der stärksten Wasserversorgung erreicht dabei in 2023 eine maximale Wuchshöhe von 40,2 cm (am 02.10.2023); die Pflanzung des mittleren Regimes zur selben Zeit 38,8 cm und das minimale Regime über 7 Wochen später ihre größte Höhe von 37,8 cm (am 24.11.2023). Die Maximalhöhe des unbewässerten Feldes weist eine Höhe von 35,5 cm auf. Nichtsdestotrotz sind in 2023 keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Regimen festzustellen (Signifikanztests siehe Anhang 6). Dies ist mit der Anwachsphase der noch jungen Pflanzen sowie mit der vergleichsweise guten Regenwasserversorgung in 2023 (Vgl. Klimadiagramm 2023 Abb. 9) zu begründen.

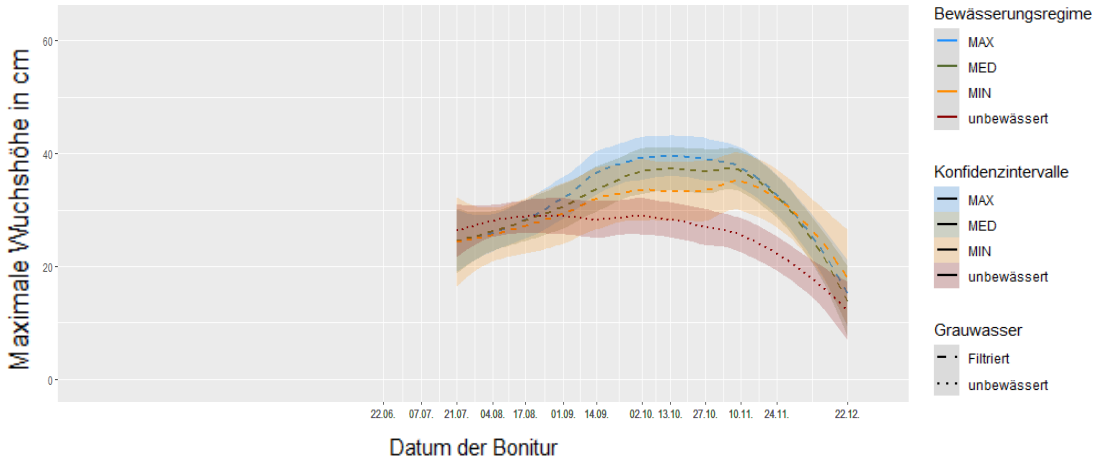


Abbildung 44: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit filtrierter Grauwasserbewässerung der Gruppe 3 in 2023 (geglättete Werte mit Konfidenzintervall)

In 2024 (Abb. 45) fallen die Unterschiede zwischen den Regimen teils größer aus, was in der Etablierung der Pflanzung und der trockeneren ersten Jahreshälfte in 2024 im Vergleich zu 2023 begründet werden kann (Niederschlag von Januar bis Juli: 265 mm in 2024 vs. 340 mm in 2023). Die Pflanzen des maximalen Regimes sind unter filtrierter Grauwasserbewässerung im Mittel 8,1 cm größer als die des medialen Regimes und 6,6 cm größer als die des minimalen Regimes. Das bedeutet, dass die Pflanzen des minimalen Regimes wider Erwarten im Mittel 1,5 cm größer sind als die des medialen Regimes. Diese Differenz kommt aufgrund der unterschiedlich starken Besonnung der Felder zustande. Der Unterschied der bewässerten Felder zum unbewässerten Feld ist wie in 2023 deutlich: im Mittel werden die Pflanzen mit der größten Wasserverfügbarkeit 15,9 cm größer als die Pflanzen auf dem Feld ohne Bewässerung (signifikantes Ergebnis, $p = 0.002$). Die Pflanzen unter medialer Bewässerung sind 7,8 cm größer (kein signifikanter Unterschied) und die unter minimaler Bewässerung im Schnitt 9,3 cm größer (signifikanter Unterschied, $p = 0.045$) als die nicht bewässerte Vegetation. Bei Betrachtung der gesamten Vegetationsperiode sind in 2023 keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den bewässerten Regimen festzustellen (Signifikanztests siehe Anhang 6). Bei alleiniger Betrachtung der Sommermonate vom 1. Juni bis 30. September sind dahingegen signifikante Unterschiede zwischen dem minimalen und maximalen Regime feststellbar ($p = 2.54*10^{-4}$, mittlere Differenz 11,0 cm). Aufgrund der vergleichsweisen schwachen Entwicklung des medialen Felds sind keine signifikanten Unterschiede zwischen dem minimalen und medialen Regime vorhanden (Ursache: unterschiedlich starke Besonnung). Während der Hitzeperiode ist demnach eine Bewässerung vorteilhaft um die Vitalität der Pflanzen steigern. Selbst bei minimaler Bewässerung ist ein signifikanter Effekt im Gegensatz zur gänzlich unbewässerten Vegetation zu beobachten. Bei höherer Wasserverfügbarkeit (2,4 L/m²/d entsprechend des maximalen Regimes) werden die Pflanzen nachweislich wuchsstärker als bei niedrigerer Bewässerungsmenge (0,6 L/m²/d, minimales Regime). Die Vegetation mit der stärksten Wasserversorgung erreicht dabei in 2023 eine maximale Wuchshöhe von 69,3 cm (am 07.06.2024), was einer Zunahme um 29,1 cm zum Vorjahr entspricht. Die

Pflanzung mit mittlerer Wasserverfügbarkeit weist im Maximum 53,8 cm (am 24.05.2024; + 15 cm im Vergleich zu 2023) und die mit minimaler Versorgung 52,3 cm (am 07.06.2024; + 14,5 cm zu 2023) auf. Das unbewässerte Feld erreicht ihr Maximum später als die bewässerten Felder und kann lediglich eine Höhe von 45,2 cm im Maximum verzeichnen (am 21.06.2024; + 9,7 cm zu 2023).

Die schlechtere Performance des medial bewässerten Feldes lässt sich auf die stärkere Besonnung zurückführen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass unter schattigen Bedingungen bereits eine geringe Bewässerungsmenge von 0,6 L/m²/d (entsprechend dem minimalen Regime) ausreicht, um vergleichbare Wuchshöhen zu erzielen wie unter voller Besonnung mit der doppelt so hohen Wassermenge von 1,2 L/m²/d (mediales Regime).

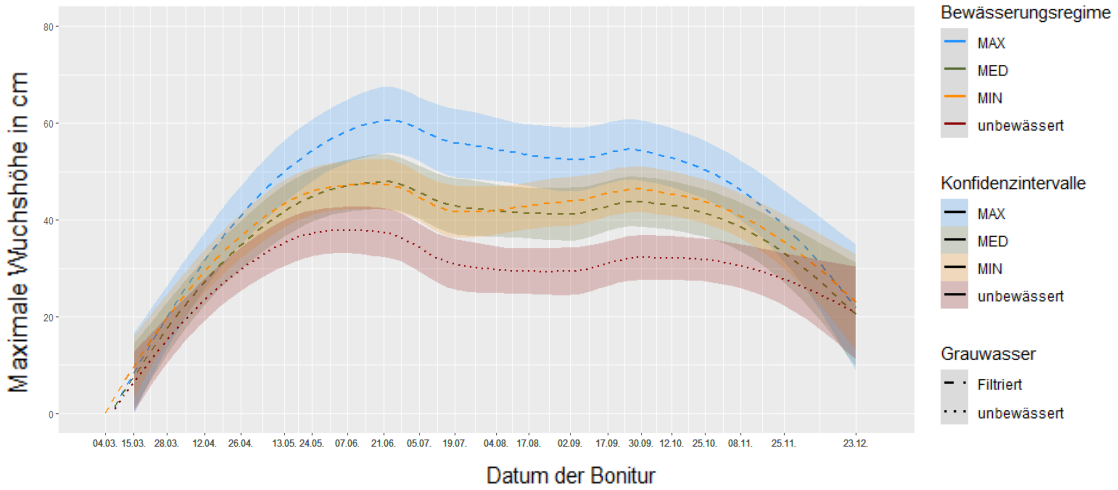


Abbildung 45: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit filtrierter Grauwasserbewässerung der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte mit Konfidenzintervall)

Geklärte Bewässerung:

Auch bei der geklärten Grauwasserbewässerung gibt es bei den Pflanzungen in den Jahren 2023 und 2024 generell keine Auffälligkeiten. Auffällig ist lediglich in beiden Versuchsjahren eine deutlich schlechtere Entwicklung des maximalen Regimes. In 2023 erreichen die Pflanzen des maximalen Regimes eine durchschnittliche Maximalhöhe von lediglich 35,5 cm (am 02.10.2023; Abb. 46). Dieser Wert liegt sogar unterhalb der Maximalhöhe des minimalen Regimes (35,8 cm am 14.09.2023). Die Vegetation unter Medialbewässerung erreicht mit maximal 39,8 cm (02.10.2023) die höchsten Werte. Im Schnitt ist die Vegetation mit maximaler Grauwasserbewässerung 3,5 cm kleiner als mit medialer Bewässerungsmenge. Die Pflanzen der unbewässerten Fläche erreichen zwei Wochen später als das mediale Regime ihre maximale Größe von 30,5 cm. Die Ergebnisse weisen in 2023 jedoch keine statistische Signifikanz auf (siehe Anhang 6).

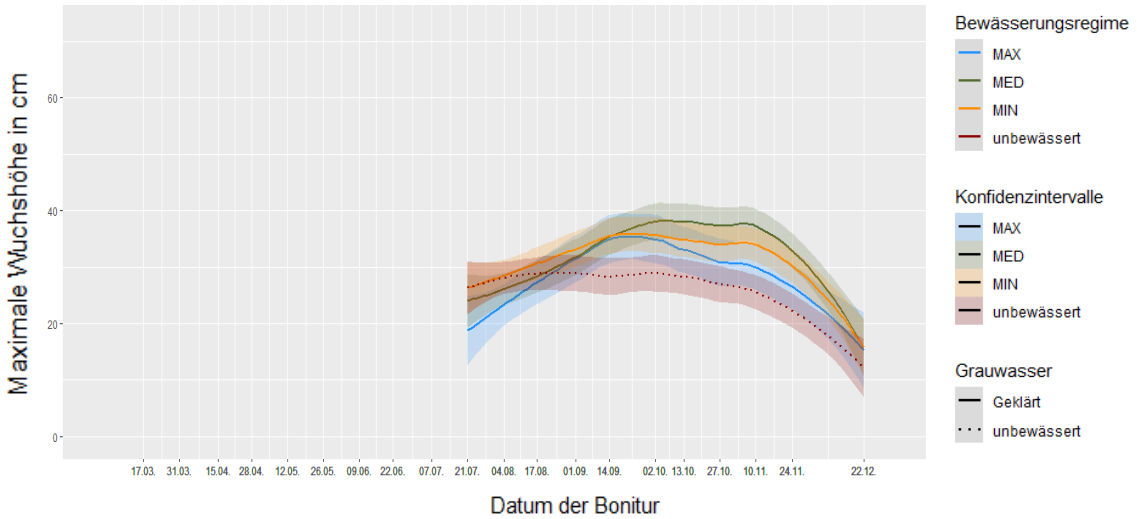


Abbildung 46: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit geklärter Grauwasserbewässerung der Gruppe 3 in 2023 (geglättete Werte mit Konfidenzintervall)

Auch in 2024 entwickelt sich die Pflanzung mit der größten Wasserverfügbarkeit zögerlicher. Sie erreicht einen maximalen Wuchs von 53,7 cm (21.06.2024) und ist damit 16,3 cm kleiner als die maximale Wuchshöhe der Pflanzung unter Medialbewässerung am 07.06.2024 (Abb. 47). Im Durchschnitt liegt die Pflanzenhöhe des medialen Regimes 2,9 cm über die des maximalen Regimes. Die Pflanzung mit geringster Wasserverfügbarkeit ist im Maximum 50,7 cm und die unbewässerte Vegetation 45,2 cm groß geworden (beide am 21.06.2024). Bei Betrachtung der gesamten Vegetationsperiode sind die Differenz zwischen der medial bewässerten und der unbewässerten Pflanzung mit einem Höhenunterschied von durchschnittlich 11,2 cm und im Maximum 24,8 cm statistisch signifikant ($p = 0.034$). Während der Sommermonate vom 1. Juni bis 30. September sind zusätzlich signifikante Unterschiede zwischen dem unbewässerten Feld und dem minimalen ($p = 0.023$) und dem maximalen ($p = 9.85*10^{-4}$) Regime feststellbar. Zudem ist die Pflanzung des medialen Regimes während des Sommers im Mittel mit 9,7 cm signifikant größer ($p = 0.010$) als die des minimalen Regimes. Die doppelte Menge an Bewässerung (1,2 L/m²/d entsprechend des medialen Regimes gegenüber 0,6 L/m²/d des minimalen Regimes) führt demnach zu einer signifikant verbesserten Wuchsleistung. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass selbst eine minimale Bewässerung im Vergleich zu keiner Bewässerung erheblich zur Verbesserung des Pflanzenwuchses beiträgt. Verlässliche Aussagen über die Effekte der Grauwasserbewässerung auf das maximale Regime können an dieser Stelle nicht getroffen werden. Grund dafür ist die deutlich schlechtere Perfomance.

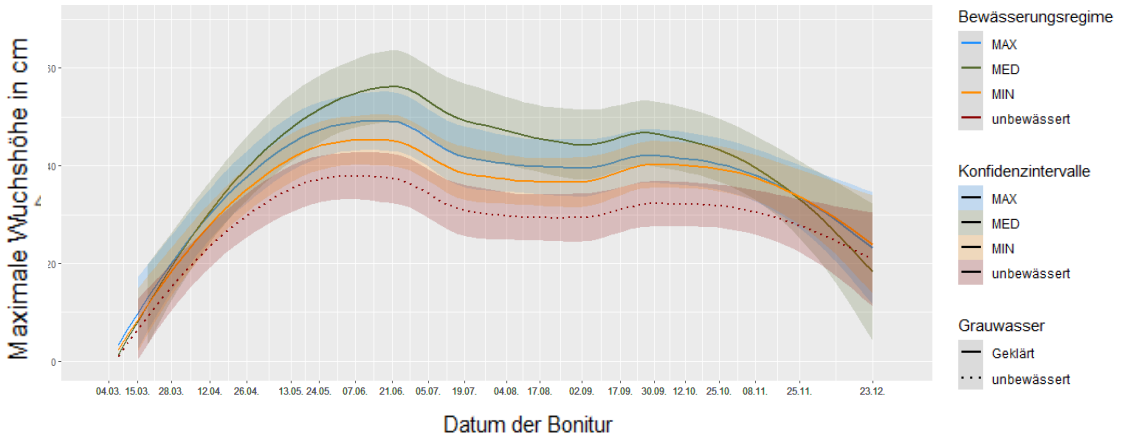


Abbildung 47: Mittlere maximale Wuchshöhe aller Arten mit geklärter Grauwasserbewässerung der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte mit Konfidenzintervall)

<u>*Auswertung der einzelnen Arten:*</u>

Alchemilla

Die größten Maximalwuchshöhen von 46 cm werden unter filtrierter Grauwasserbewässerung mit der größten Wasserverfügbarkeit gemessen. Die Alchemilla (Abb. 48) des maximalen Regimes bei geklärter Grauwasserbewässerung ist im Vergleich dazu 6 cm bzw. in den Sommermonaten (01.06.-30.09. im Mittel 4,2 cm kleiner, was sich in der stärkeren Besonnung des Forschungsfeldes begründen lässt. Die Wuchshöhe des geklärten medialen Regimes, das im Hochsommer ab 17:00 verschattet ist, hat zwar mit 36 cm eine etwas geringere Maximalwuchshöhe als das entsprechende maximale Regime, überholt jedoch ab Ende Juli / Anfang August das Regime mit höherer Wasserverfügbarkeit. Die Wuchshöhe unter medialer Wasserverfügbarkeit ist bei geklärter Bewässerung im Maximum 9 cm größer als bei filtrierter Bewässerung, was sich wiederum in der stärkeren Besonnung des Felds mit filtrierter Bewässerung begründet. Die minimalen Regime unterscheiden sich mit einer Differenz in der Maximalhöhe von 0,5 cm nur sehr marginal. Das unbewässerte Feld schneidet am schlechtesten ab und erreicht erst einen Monat später als die anderen Regime am 21. Juni 2024 ihre maximale Höhe von 25 cm. Nichts desto trotz weist die unbewässerte Alchemilla lediglich eine mittlere Differenz von 1,9 cm zum minimalen Regime (geklärte Bewässerung) auf.

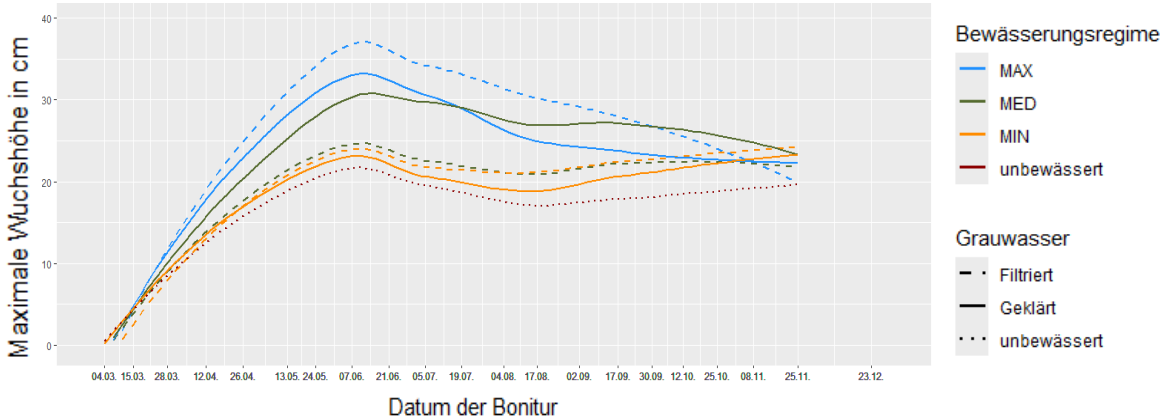


Abbildung 48: Mittlere maximale Wuchshöhe der Alchemilla mit geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung je nach Bewässerungsregime der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte)

Campanula rotundifolia

Das maximale Regime mit filtriertem Grauwasser erreichte mit 75 cm am 07.06. die höchste Wuchshöhe. Das mediale Regime mit geklärtem Grauwasser wies ebenfalls eine vergleichsweise hohe Wuchshöhe von 62 cm am 07.06. auf. Auffällig ist, dass die maximale Wuchshöhe unter MAX (geklärt) deutlich geringer ausfiel als unter MAX (filtriert). Eine mögliche Ursache hierfür könnte eine stärkere Sonneneinstrahlung auf die Fläche mit geklärtem Grauwasser sein. Auch das mediale Regime zeigte deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Grauwasserart: Während unter geklärtem Grauwasser eine Wuchshöhe von 62 cm erreicht wurde, blieb die Wuchshöhe unter filtrierter Bewässerung mit 40 cm deutlich niedriger. Auch hier könnte eine unterschiedliche Besonnung die beobachteten Unterschiede beeinflusst haben. Die beiden minimalen Bewässerungsregime (filtriert/geklärt) erreichten eine identische maximale Wuchshöhe von 43 cm, wobei sich im Mittel ein um 2,2 cm höheres Wachstum unter filtriertem Grauwasser im Sommer zeigte. Die geringste Wuchshöhe wurde auf der unbewässerten Fläche mit 37 cm festgestellt, was einem um 6 cm geringeren Wert im Vergleich zu den minimal bewässerten Regimen entspricht. Insgesamt weisen die Befunde darauf hin, dass die Art grundsätzlich eine hohe Toleranz gegenüber geklärtem und filtriertem Grauwasser besitzt. Zudem reagiert die Art generell positiv auf eine Bewässerung (im Vergleich zur unbewässerten Fläche).

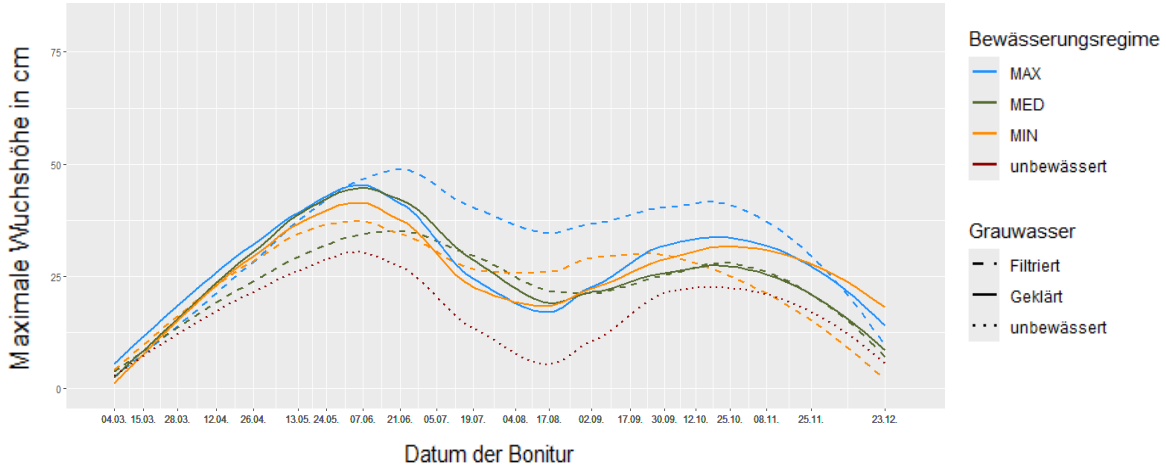


Abbildung 49: Mittlere maximale Wuchshöhe der Campanula rotundifolia mit geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung je nach Bewässerungsregime der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte)

Campanula punctata

Im maximalen Regime wurde unter filtrierter Beässerung eine maximale Wuchshöhe von 61 cm (13.05.2024) verzeichnet. Im Gegensatz dazu erreichte das maximale Regime mit geklärtem Grauwasser nur 47 cm (24.05.), was auf Standortfaktoren wie erhöhte Sonneneinstrahlung zurückzuführen sein könnte.

Auch das mediale Regime zeigte deutliche Unterschiede zwischen filtriertem und geklärtem Wasser: Während MED (filtriert) am 13.05. eine maximale Wuchshöhe von 57 cm erreichte, lag MED (geklärt) mit 71 cm (07.06.) deutlich höher. Auch hier könnte diese Diskrepanz durch die Unterschiede in der solaren Einstrahlung bedingt sein. Trotz dessen

MED (geklärt) die größte maximale Wuchshöhe aller Regime zu verzeichnen hat, ist die Campanula bei MAX (filtriert) im Hochsommer im Zeitraum zwischen dem 1. Juli und dem 31. August im Mittel 9,5 cm größer.

Im minimalen Regime traten ebenfalls Unterschiede auf. Bemerkenswert ist, dass das minimale Regime mit filtriertem Grauwasser mit 65 cm (am 13.05.2024) 4 cm über der Wuchshöhe von MAX (filtriert) liegt und das obwohl beide Felder einer gleich großen solaren Einstrahlung ausgesetzt sind. MIN (geklärt) lag mit 53 cm (13.05.) um 12 cm deutlich unter MIN (filtriert). Das unbewässerte Feld erreichte eine Maximalwuchshöhe von 58 cm und lag damit sogar über dem minimalen Regime mit geklärtem Grauwasser.

Im Hochsommer scheinen sich die Werte unabhängig von der Grauwasserart und Bewässerungsmenge bis auf MAX (filtriert) anzugleichen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Campanula punctata kurzfristige Trockenperioden unabhängig von der Bewässerungsmenge tolerieren kann. Eine regelmäßige Bewässerung, insbesondere während der Blütezeit, kann jedoch ein optimales Wachstum fördern. Im Hochsommer sticht MAX (filtriert) positiv heraus, was auf die hohe Wasserzufuhr mit gleichzeitig höherer Nährstoffzufuhr durch den Verzicht auf eine Vorklärung mittels der Pflanzenkläranlage zurückzuführen sein kann.

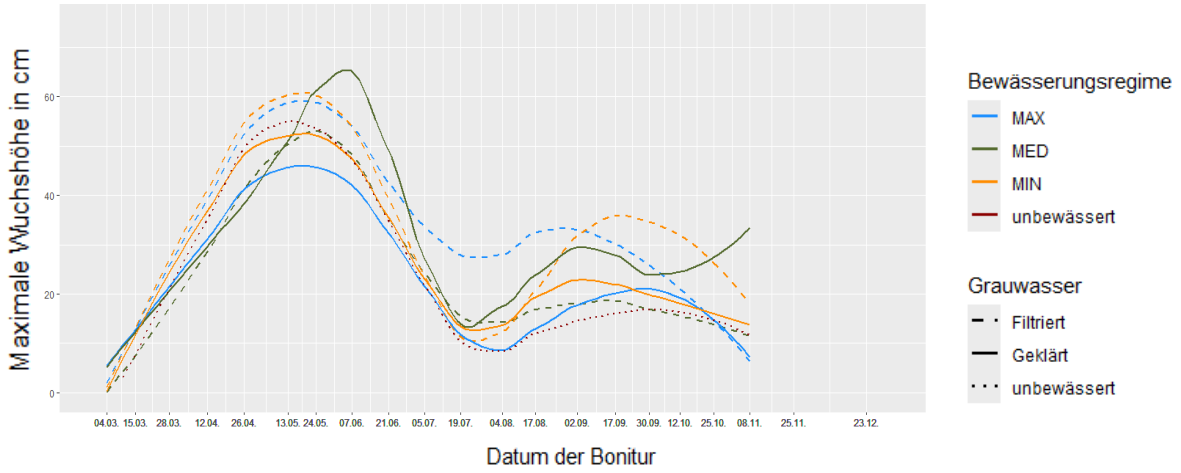


Abbildung 50: Mittlere maximale Wuchshöhe der Campanula punctata mit geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung je nach Bewässerungsregime der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte)

Hemerocallis

Bei der Hemerocallis fällt auf, dass die mittleren Wuchshöhen von MIN, MED und MAX bei filtrierter Grauwasserbewässerung gegenüber der geklärten Bewässerung am höchsten sind. Selbst MIN (filtriert) ist mit einer durchschnittlichen Höhe von 64,7 cm 3,3 cm größer als MED (geklärt), und das obwohl Letzteres unter den Regimen mit geklärtem Grauwasser den größten Wuchs (im Mittel 61,4 cm) aufweist.

Im maximalen Regime wurde unter filtrierter Bewässerung die größte maximale Wuchshöhe aller Regime von 103 cm (07.06.2024) verzeichnet. Auch im Mittel schneidet das Regime (mit 70 cm über die gesamte Vegetationsperiode berechnet) am besten ab. Im

Gegensatz dazu erreichte das maximale Regime mit geklärtem Grauwasser zur selben Zeit maximal 82 cm.

Die kleinste Wuchshöhe ist beim unbewässerten Feld zu verorten. Hier wird die Hemerocallis maximal 70 cm hoch und liegt dabei 7 cm hinter dem minimalen Regime bei geklärter Grauwasserbewässerung sowie 30 cm bzw. 33 cm hinter den beiden wuchsstärksten Regimen – MED (geklärt) und MAX (filtriert).

Analog zu den Ergebnissen der vorherigen Arten schneiden auch hier MAX (geklärt) mit durchschnittlich lediglich 1,5 cm und MED (filtriert) mit durchschnittlich 1,7 cm höherer Wuchshöhe als das minimale Regime der entsprechenden Grauwasserart jeweils ein geringeres Wachstum als erwartet. Mögliche Ursache sind auch hier die Unterschiede in der solaren Einstrahlung auf die Versuchsflächen.

Die Art Hemerocallis profitiert eindeutig von der Bewässerung mit filtriertem Grauwasser gegenüber dem geklärten Grauwasser, was in der Nährstoffzusammensetzung begründet sein kann.

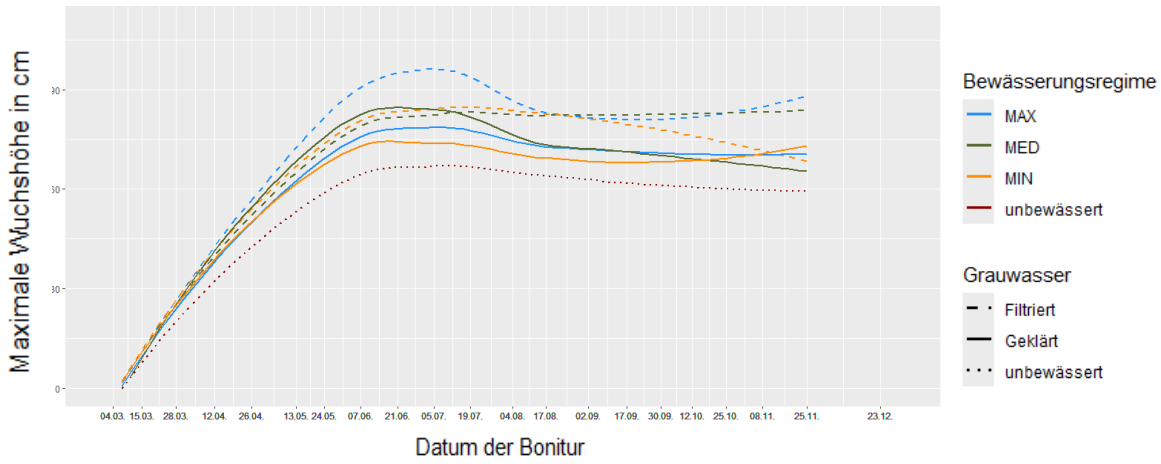


Abbildung 51: Mittlere maximale Wuchshöhe der Hemerocallis mit geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung je nach Bewässerungsregime der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte)

Knautia

Im maximalen Regime wurde unter filtrierter Bewässerung die größte maximale Wuchshöhe von 73 cm (25.10.2024) verzeichnet. Im Gegensatz dazu erreichte die größte Wuchshöhe bei geklärter Grauwasserbewässerung das mediale Regime mit 64 cm (am 08.11.2024). Die größte Wuchshöhe des maximalen Regimes (geklärt) liegt auch bei der Knautia (im Maximum 6 cm und im Mittel 2,4 cm) hinter dem von MED (geklärt). Ebenso weist wie bei allen anderen Arten MED (filtriert) ein Wachstumsdefizit auf.

Abgesehen davon zeigt die Knautia bei geklärter Grauwasserbewässerung einen deutlichen Unterschied zwischen MIN und MED, wobei die Felder aufgrund ihrer ähnlichen solaren Einstrahlung gut vergleichbar sind. Die durchschnittliche Wuchshöhe von MIN (geklärt) ist um 9,6 cm kleiner als die von MED (geklärt). Im Maximum erreicht MIN lediglich 39 cm, was 25 cm weniger ist als die maximale Wuchshöhe von MED (geklärt).

Die Felder MAX (filtriert) und MIN (filtriert) liegen in ihrer Maximalwuchshöhe 10 cm auseinander. MIN (filtriert) ist in den Sommermonaten (01.06.-30.09.) im Schnitt 5,9 cm kleiner als die Knautia des maximalen Regimes (filtriert).

Das unbewässerte Feld zeigt mit 34 cm im Maximum die geringsten Höhen und liegt damit 5 cm unter MIN (geklärt). Im Durchschnitt ist die Art ohne Bewässerung in den Sommermonaten 4,4 cm kleiner als MIN (geklärt) und 10,4 cm kleiner als MIN (filtriert). Somit hat sich MIN (filtriert) deutlich besser entwickelt als MIN (geklärt).

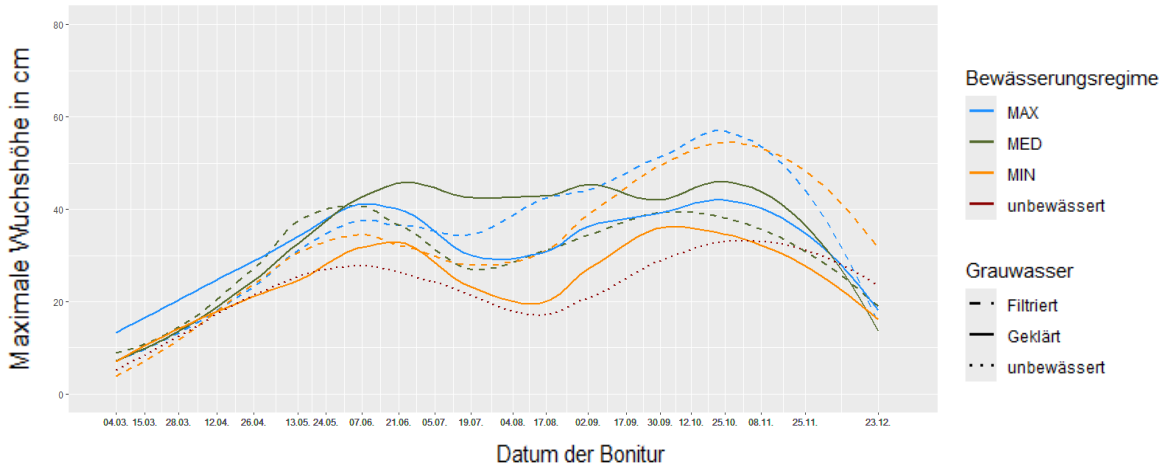


Abbildung 52: Mittlere maximale Wuchshöhe der Knautia mit geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung je nach Bewässerungsregime der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte)

Molinia

Die größten Wuchshöhen wurden unter filtriertem Grauwasser im maximalen Regime erreicht (105 cm am 07.06.2024; 76 cm für MAX (geklärt)). Die medial bewässerten Pflanzungen zeigen unter geklärtem Grauwasser größere Höchstwerte als unter filtriertem Grauwasser (101 cm vs. 80 cm). Allerdings war das MED-Regime mit filtriertem Grauwasser einer stärkeren Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Die minimalen Regime (filtriert und geklärt) erreichen eine Wuchshöhe von höchstens 74 cm.

Betrachtet man die Felder mit ähnlicher Sonneneinstrahlung (MAX und MIN unter filtriertem Grauwasser), zeigt sich, dass eine erhöhte Wasserzufuhr zu einem deutlichen Anstieg der Wuchshöhe führt (Höchstwerte von 105 cm vs. 76 cm). Dies deutet darauf hin, dass Molinia auch ohne Klärung des Grauwassers gut gedeiht. Der Vergleich von MED und MIN bei geklärter Grauwasserbewässerung (101 cm vs. 75,5 cm) zeigt ebenfalls einen deutlichen Wuchsvorteil durch eine intensivere Bewässerung.

Der komplette Verzicht auf Bewässerung hat sich hingegen stark auf das Wachstum ausgewirkt, mit einer maximalen Wuchshöhe von nur 66 cm. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Molinia sowohl mit filtriertem als auch mit geklärtem Grauwasser gut zurechtkommt. Auch bei dieser Art zeigt sich, dass sich eine zeitweise Beschattung positiv auf das Wasserdargebot auswirkt und demnach den Wuchs stärkt.

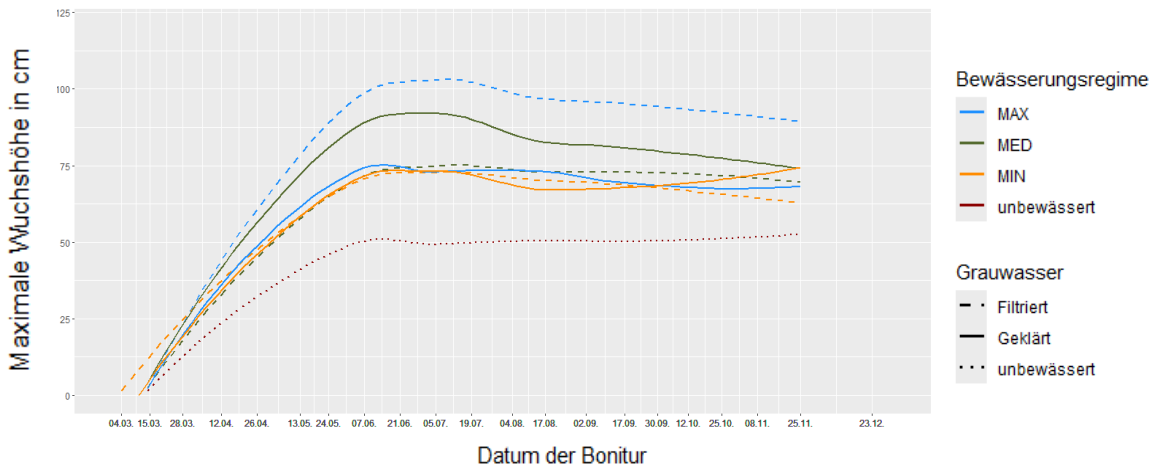


Abbildung 53: Mittlere maximale Wuchshöhe der Molinia mit geklärter und filtrierter Grauwasserbewässerung je nach Bewässerungsregime der Gruppe 3 in 2024 (geglättete Werte)

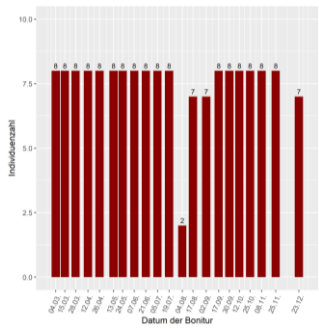
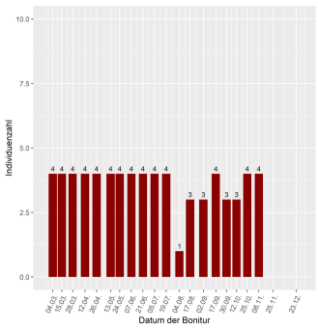
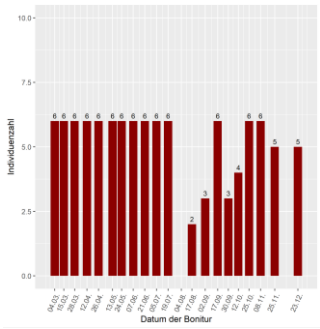
Individuenzahl

Die Analyse der Individuenzahlen auf den bewässerten Flächen sowie dem unbewässerten Referenzfeld zeigt Unterschiede in der Stabilität der Bestände über die Vegetationsperiode hinweg. Während die Individuenzahlen auf den bewässerten Flächen konstant blieben (Anhang 7), haben die Stauden auf dem unbewässerten Referenzfeld ihr oberirdisches Wachstum teils vollständig eingestellt, um den physiologischen Trockenstress zu überdauern. Dieses Phänomen wurde Anfang August erstmals dokumentiert, jedoch erholten sich die Bestände bis Ende Oktober/Anfang November wieder indem sie erneut austrieben. Im Folgenden werden die artspezifischen Entwicklungen für das unbewässerte Feld im Jahr 2024 näher betrachtet.

Zu den Arten mit stabilen Beständen zählen Alchemilla, Hemerocallis und Molinia, deren Individuenzahlen über den gesamten Beobachtungszeitraum konstant blieben.

Im Gegensatz dazu wiesen andere Arten eine ausgeprägte Instabilität in ihrer Individuenzahl auf. Campanula rotundifolia zeigte während des Hochsommers einen sichtbaren Rückgang der oberirdischen Pflanzenteile bei etwa 75 % der Individuen. Diese Rückzugsstrategie ist jedoch nicht dauerhaft, sondern als temporäres Einziehen der Staude zu interpretieren, um ungünstige Witterungsbedingungen zu überdauern. Der Bestand von C. rotundifolia regenerierte sich bis zum 17.09.2024 weitgehend wieder. Ein vergleichbares Muster zeigte sich bei Campanula punctata: Rund 75 % der Individuen zogen im Hochsommer ihre oberirdischen Pflanzenteile ein, bevor es im Herbst zu einer Regeneration kam, sodass bis Ende Oktober wieder die ursprüngliche Populationsdichte erreicht wurde. Die stärksten Schwankungen wurden bei Knautia beobachtet. Am 04.08.2024 waren keine Individuen mehr sichtbar. Im Anschluss setzte eine schrittweise Erholung ein, sodass am 17.09.2024 die ursprüngliche Individuenzahl wieder erreicht wurde. Allerdings kam es anschließend erneut zu einem Rückgang, bevor sich der Bestand bis zum 25.10.2024 schließlich wieder vollständig stabilisierte. Bei allen bewässerten Forschungsflächen, konnte das Einziehen der Individuen verhindert werden.

Tabelle 9: Individuenzahlen ausgewählter Arten auf der unbewässerten Referenzfläche (Gruppe 3)

Campanula rotundifolia	Campanula punctata	Knautia
		

Blühende Individuen

Die Gruppe 3 wurde im Juli 2023 komplett neu bepflanzt – aus diesem Grund werden die blühenden Individuen nur für das Jahr 2024 ausgewertet. Aufgrund der unterschiedlichen Blütezeiten wird hier kein Mittelwert aller Arten analysiert, sondern jede Art ausgewertet.

Alchemilla

Die Alchemilla blüht in allen Regimen, unabhängig von der Art und Menge des Grauwassers, sowie auch im unbewässerten Referenzfeld, von Ende Mai bis Ende Juni mit einer gleich hohen Anzahl an Individuen. Dies ist unter anderem an der stabilen Individuenzahl über die gesamte Vegetationsperiode begründet. Die Art Alchemilla mollis, die hauptsächlich im Juni und Juli mit möglichen Ausdehnungen bis in den August blüht, hat ihre Blütezeit bereits Anfang Juli abgeschlossen, noch vor der besonders heißen Hitzeperiode. Dadurch sind tendenziell weniger starke Unterschiede zwischen den Regimen zu verzeichnen. Die Pflanzen auf den bewässerten Feldern zeigen eine längere Blühdauer als auf dem unbewässerten Feld. Auffällig ist, dass die Zahl blühender Individuen bei den Feldern mit geringerer Wasserverfügbarkeit gegen Ende hin stärker abnimmt. Das erste blühende Individuum im Jahr 2024 wurde im maximal bewässerten Regime unter geklärtem Grauwasser beobachtet. Überraschenderweise zeigte alleinig die Alchemilla des minimalen Regimes unter filtrierter Bewässerung eine zweite Blühperiode von Ende September bis Anfang November.

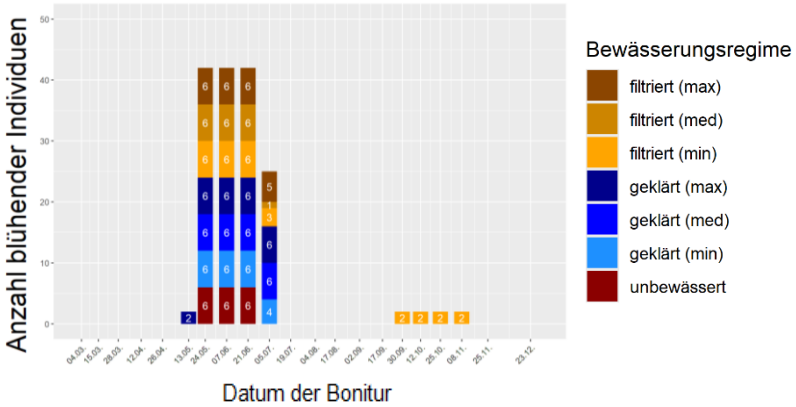


Abbildung 54: Anzahl der blühenden Alchemilla der Gruppe 3 in 2024

Campanula punctata

Die Campanula punctata blüht typischerweise von Juni bis August. Die Blühaktivität von der Art unterliegt auf dem Gründach deutlichen zeitlichen Schwankungen, wobei die höchsten Blühzahlen zwischen Ende Mai und Anfang Juni erfasst wurden. Nach diesem Zeitraum nimmt die Zahl der blühenden Individuen zunächst ab, bevor im Spätsommer und Herbst erneut Blühereignisse auftreten. Das erste blühende Individuum wurde bereits am 13. Mai 2024 im minimalen Bewässerungsregime mit filtriertem Grauwasser festgestellt. Bei den Bonituren Ende Mai und Anfang Juni zeigte die Campanula in allen Feldern, unabhängig von der Bewässerung, eine vergleichbare Blühintensität, einschließlich des unbewässerten Feldes.

Die maximal bewässerten Felder, insbesondere jene mit filtriertem Wasser, wiesen insgesamt die höchsten Blühzahlen auf. Im Gegensatz dazu zeigten Felder des maximalen Regimes mit geklärtem Grauwasser aufgrund einer stärkeren Sonneneinstrahlung tendenziell eine geringere Anzahl blühender Individuen, was auf eine mögliche Stressreaktion hinweist.

Die mittelstark bewässerten Felder, insbesondere MED (filtriert) zeigten ebenfalls eine hohe Blühintensität, wobei jedoch ein Unterschied in der Entwicklung zwischen den Grauwasserarten zu beobachten war: MED (filtriert) wies aufgrund intensiverer Sonneneinstrahlung eine schlechtere Blühentwicklung auf als MED (geklärt).

Das minimale Regime mit filtrierter Bewässerung zeigte zudem eine höhere Blühintensität als das minimale Regime mit geklärtem Grauwasser, was die Hypothese unterstützt, dass das höhere Nährstoffangebot des filtrierten Grauwassers eine förderliche Wirkung auf die Blütenbildung hat. Dies könnte ein gesteigertes Nahrungsangebot für Bestäuberarten wie Bienen und andere Insekten bedeuten. Im Vergleich dazu wiesen die unbewässerten Felder eine signifikant geringere Blühintensität und eine kürzere Blühperiode auf, was die entscheidende Rolle der Bewässerung bei der Förderung der Blühaktivität unterstreicht.

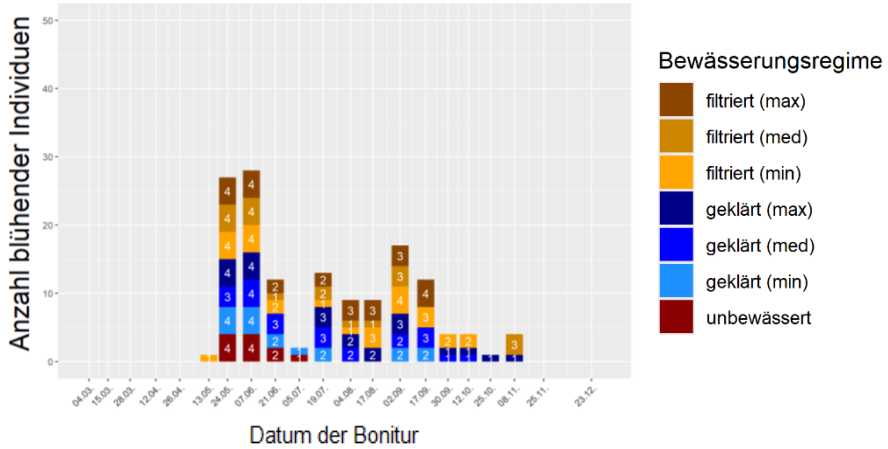


Abbildung 55: Anzahl der blühenden Campanula punctata der Gruppe 3 in 2024

Campanula rotundifolia

Die typische Blütezeit der Campanula rotundifolia liegt zwischen Juni bis September. Der Höhepunkt der Blüte für die Art ist auf dem Gründach Ende Juni (Abb. 56). Zu diesem Zeitpunkt blühen unabhängig vom Bewässerungsregime alle Individuen, selbst die des unbewässerten Forschungsfeldes. Auffällig ist jedoch, dass die unbewässerten Campanula viel kürzer, das heißt von Ende Mai bis Anfang Juli sowie ein zweites Mal von Ende September bis Dezember blühen. Bei den bewässerten Feldern ist selbst bei minimaler Bewässerung eine durchgehende Blütenbildung ab Mitte Mai bis in den November/Dezember festzustellen. Die Art reagiert in den heißen Sommermonaten bei einer höheren Bewässerungsmenge i. d. R. mit einer deutlich erhöhten Anzahl blühender Individuen – das ist insbesondere bei der filtrierten Grauwasserbewässerung der Fall. Generell profitiert die Art von der Bewässerung mit filtriertem Grauwasser, da die Blütenbildung teilweise doppelt so hoch ist wie bei der Bewässerung mit geklärtem Grauwasser. So wurden beispielsweise am 19. Juli unter maximaler Bewässerung 8 blühende Individuen unter filtrierter Grauwasserbewässerung gezählt, während es unter geklärtem Grauwasser nur die Hälfte (4) waren – ein Muster, das sich auch bei mittlerer Bewässerung (MED) zeigt. Bei minimaler Bewässerung sind diese Beobachtungen nicht so eindeutig.

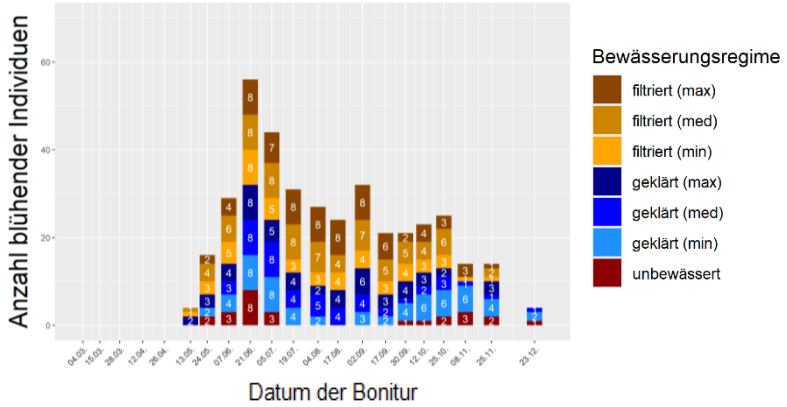


Abbildung 56: Anzahl der blühenden Campanula rotundifolia der Gruppe 3 in 2024

Hemerocallis

Die Hemerocallis citrina blüht typischerweise von Juli bis September. Bei der Art wurde bei der Bonitur am 21. Juni 2024 in allen Feldern unabhängig ihrer Bewässerung die gleiche Anzahl an blühenden Individuen erfasst (Abb. 57). Bei einer nachträglichen Zählung der einzelnen Blütenstände (einschließlich noch ungeöffneter Blüten) ist erkennbar, dass die unbewässerte Pflanzung mitunter die wenigsten Blüten bildet (8 Stück). MIN (geklärt; halbschattig) und MED (filtriert; sonnig) weisen die gleiche Anzahl auf. Die maximalen Regime bilden unter filtrierter Grauwasserbewässerung (schattiger Standort) 18 und unter geklärter Bewässerung (sonniger Standort) 10 Blütenstände. Eine zweite Blühphase im Herbst ist lediglich bei der maximalen Bewässerung unter geklärter Grauwasserbewässerung festzustellen. Die Hemerocallis citrina ist bekannt dafür bei optimalen Bedingungen, wie ausreichender Wasserverfügbarkeit, ein zweites Mal Blüten zu bilden. Es gilt in

weiteren Untersuchungen zu klären, ob die Bewässerung mit geklärtem Grauwasser dazu geführt hat, eine zweite Blühphase hervorzurufen.

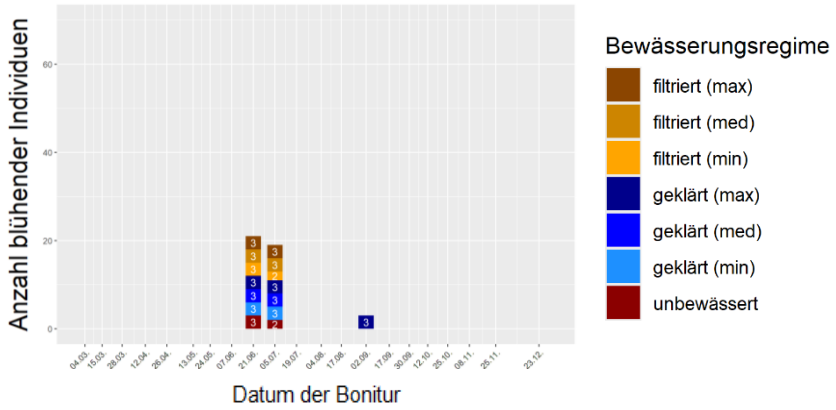


Abbildung 57: Anzahl der blühenden Hemerocallis der Gruppe 3 in 2024

Knautia

Die Knautia macedonica 'Mars Midget' blüht typischerweise von Juni bis Oktober. Die Knautia zeigt in der vorliegenden Untersuchung eine ausgeprägte und langanhaltende Blühphase, die durch zwei Hauptblütezeiten charakterisiert ist. Die erste Hauptblüte beginnt Ende Mai und erreicht ihren Höhepunkt Anfang Juni mit bis zu 42 blühenden Individuen (07.06.), gefolgt von einem deutlichen Rückgang der Blütenbildung im Juli. Ab Ende August setzt eine zweite, wenn auch weniger ausgeprägte Blühphase ein, die sich bis in den Dezember hinein erstreckt (Höchstwert im Herbst (Oktober) mit 30 blühenden Individuen). Die Blühaktivität ist teils stark von der Bewässerung abhängig. Während unbewässerte Individuen eine unterbrochene und während der zweiten Blütephase eine reduzierte Blüte (maximal 2 Individuen) zeigen, bleibt die Blütenproduktion unter allen Bewässerungsregimen i. d. R. über längere Zeit konstant. Auffällig ist jedoch, dass die unbewässerte Knautia während der ersten Hauptblütezeit gleichauf mit anderen Bewässerungsregimen blühen (6 Individuen am 29.06.). Besonders bei filtrierter Grauwasserbewässerung wird im Vergleich zum geklärten Grauwasser eine durchgängig hohe Anzahl blühender Individuen verzeichnet. Beispielsweise sind am 12. Oktober unter filtrierter Bewässerung insgesamt 17 blühende Individuen zu sehen, während es unter geklärtem Grauwasser nur 11 Individuen sind. Bei filtrierter Bewässerung reichte teils eine minimale Wassermenge aus, um gleich viele oder sogar mehr Blüten zu bilden als beim medialen und maximalen Regime (am 08.11.2024 6 blühende Individuen (MIN) vs. 4 Individuen bei MED und MAX). Die Art scheint demnach selbst von einer minimalen Bewässerung sowie auch von den verbliebenen Nährstoffen im filtrierten Grauwasser zu profitieren.

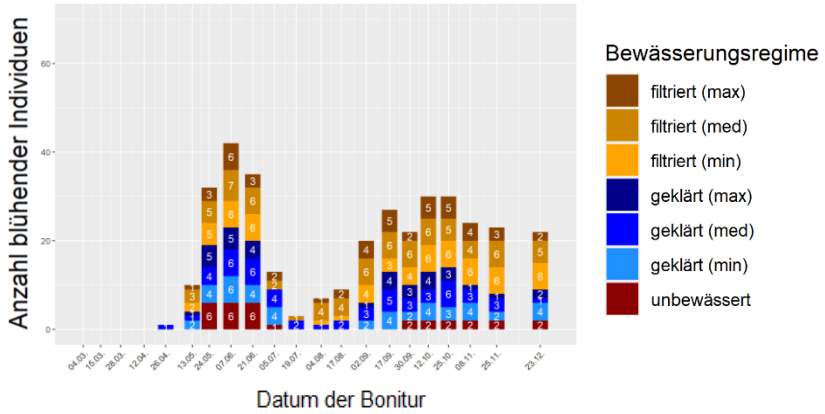


Abbildung 58: Anzahl der blühenden Knautia der Gruppe 3 in 2024

Molinia

Die Molinia arundinacea 'Cordoba' blüht typischerweise von Juli bis September. Die Molinia zeigt auf dem Gründach eine hohe Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Wasserverfügbarkeiten. Vom 24. Mai bis zum 25. November ist ein konstantes Blütenbild mit lediglich einer kurzen Unterbrechung im unbewässerten Forschungsfeld zwischen Ende August und Anfang September zu verzeichnen. Demnach entwickeln sich die Blüten der Molinia unabhängig von der Art des Grauwassers (filtriert/geklärt) sowie der Menge der Bewässerung gut. Selbst bei Verzicht der Bewässerung bildet die Art Blüten.

Deckungsgrad

Unter filtrierter Grauwasserbewässerung zeigt der Bedeckungsgrad in 2023 das erwartete Muster in Abhängigkeit von der Bewässerungsmenge: Die maximale Bewässerung (filtriert) führt zum höchsten Bedeckungsgrad (65 % am 04.10.2023), während bei medialer und minimaler Bewässerung (filtriert) entsprechend ein mittlerer (58 % am 04.10.2023) bzw. geringerer (45 % am 16.10.2023) Bedeckungsgrad beobachtet wird (Abb. 59, unten rechts).

Unter geklärter Grauwasserbewässerung zeichnet sich analog zur Wuchshöhe das Muster ab, dass die Pflanzen unter maximaler Bewässerung aufgrund der Besonnungssituation ein deutliches Wachstumsdefizit aufweisen (Abb. 59, unten links; Drohnenaufnahmen des Forschungsfeldes in Anhang 8). Aus diesem Grund weist das mediale Regime (geklärt, schattig) mit 63 % (am 04.10.2023) die höchste Bedeckung auf. Das minimale Regime (geklärt, halbschattig) erreicht eine maximale Bedeckung von 60 %, kurze Zeit später als MED (geklärt), am 16. Oktober 2023. Das maximale Regime, welches von Beginn an eine schlechtere Bedeckung aufweist, liegt mit seiner Maximalbedeckung 3 % hinter dem minimalen Regime (57 % am 16.10.2023).

Beim Vergleich der filtrierten und der geklärten Bewässerung zeigt sich, dass bei geklärter Grauwasserbewässerung des medialen und minimalen Regimes höhere Bedeckungsgrade erreicht werden. Die unbewässerten Pflanzen erzielen dahingegen maximal 39 % Bedeckung und liegen somit immer noch 6 % hinter MIN (filtriert), welches von den bewässerten Regimen am schlechtesten abschneidet. Es ist anzunehmen, dass

MAX (geklärt) bei einer geringeren Besonnung analog zu MED und MIN bessere Ergebnisse erzielen würde als MAX (filtriert).

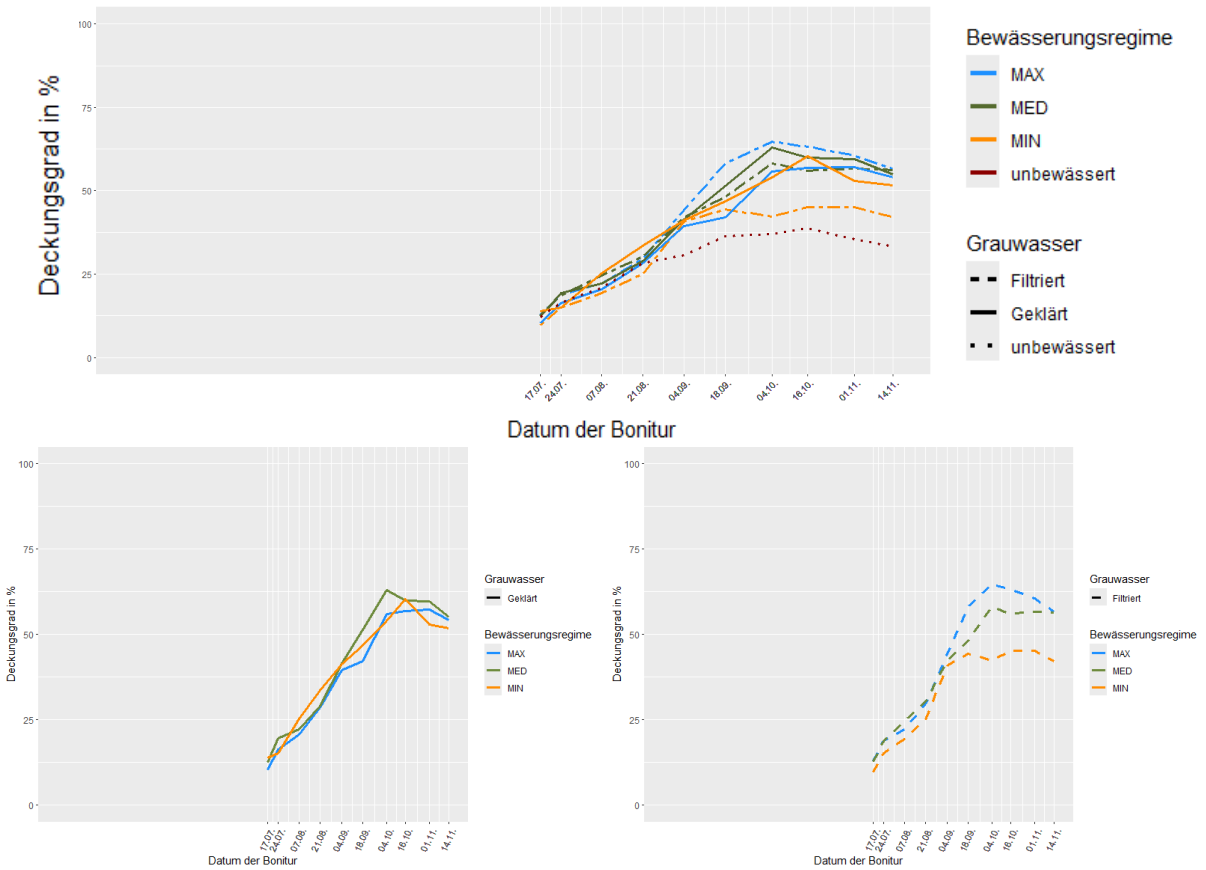


Abbildung 59: Mittlere Deckungsgrade aller Arten der Gruppe 3 in 2023 im Vergleich zur unbewässerten Referenzfläche sowie darunter die geklärte Bewässerung (links) und die filtrierte Bewässerung (rechts).

Den Ergebnissen aus 2023 ist anzumerken, dass es sich bei der Gruppe 3 um Jungpflanzen handelt, die noch nicht ihre volle Entwicklung erreicht haben, was durch den Zeitvergleich in Abbildung 60 deutlich wird.

Abbildung 60: Exemplarischer Zeitvergleich des Felds III-2 (mediales Regime, geklärt) der Gruppe 3 bei Neupflanzung (obere Aufnahme vom 24.07.2023), zu Ende der ersten Vegetationsperiode (mittlere Aufnahme vom 04.10.2023) und im voll entwickelten Stadium in 2024 (untere Aufnahme vom 24.06.2024).

Am 04. Oktober 2023 sind die Unterschiede zwischen den Regimen der filtrierten Grauwasserbewässerung stärker ausgeprägt als bei geklärten Bewässerungsregimen (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: UAV-Aufnahmen inkl. Deckungsgrade der Felder mit geklärter Grauwasserbewässerung und filtrierter Grauwasserbewässerung im Gegensatz zur unbewässerten Referenzfläche am 04.10.2023 (Gruppe 3)

geklärt			**filtriert**		
MAX	**MED**	**MIN**	**MAX**	**MED**	**MIN**
56 %	63 %	54 %	65 %	58 %	42 %
unbewässertes Referenzfeld mit gleicher Bepflanzung					
37 %					

Die Deckungsgrade von 2024 zeigen ähnliche Trends wie in 2023.

Unter filtrierter Grauwasserbewässerung zeigt der Bedeckungsgrad auch in 2024 das erwartete Muster in Abhängigkeit von der Bewässerungsmenge: Die maximale Bewässerung (filtriert) führt zum höchsten Bedeckungsgrad (96 % am 28.10. 2024). Damit ist die maximale Bedeckung im Vergleich zum Vorjahr um 31 % gestiegen. Bei medialer Bewässerung (filtriert) ist als Höchstwert trotz höherer Besonnung als MIN und MAX eine nahezu gleichgroße Bedeckung mit 94 % am 14. Oktober zu verzeichnen. Allerdings unterscheiden sich die Deckungsgrade von MAX und MED (filtriert) während der Sommermonate sehr stark voneinander und weisen Differenzen von bis zu 25 % (MAX (filtriert, schattig) mit 89 % vs. MED (filtriert, sonnig) mit 64 % am 22.07.2024) auf. Das minimale Regime (filtriert, schattig) weist mit 90 % zwar eine geringere Maximalbedeckung auf, kann jedoch nichtsdestotrotz eine dichte Bedeckung erzielen.

Zeitweise kann die Pflanzung mit Minimalbewässerung (schattig) zudem höhere Deckungsgrade als die mit Medialbewässerung (sonnig) erzielen.

Unter geklärter Grauwasserbewässerung zeichnet sich analog zu 2023 das Muster ab, dass die Pflanzen unter maximaler Bewässerung ein deutliches Wachstumsdefizit aufweisen (Abb. 61, unten links). Aus diesem Grund erreicht das mediale Regime (geklärt) einen Deckungsgrad von 100 % (am 28.10.), was einen Anstieg um 37 % zum Vorjahr darstellt, die höchste Bedeckung. Das maximale Regime, welches im Vorjahr die niedrigste Gesamtbedeckung aufwies konnte etwas aufholen und liegt mit seiner Maximalbedeckung nun bei 78 % (18.09.2024; +21 % zum Vorjahr). Damit erreicht das minimale Regime zwar immer noch eine größere Maximalbedeckung von 81 %, liegt jedoch in den Sommermonaten konstant unterhalb des maximalen Regimes. Am 5. August 2024 sind die Unterschiede zwischen MIN und MAX (geklärt) mit 23 % (MAX mit 70 % vs. MIN mit 47 %) besonders groß.

Dieser Einbruch von MIN (geklärt) kann in der Methodik sowie in unterschiedlicher Besonnung zu begründen sein. Das Regime MIN (geklärt) besitzt als einziges zwei Forschungsfelder, aus deren Werten stets ein Mittelwert gebildet wird. Am 05. August fallen die Unterschiede zwischen den beiden Feldern mit 63 % (Feld III-1) und 30 % (Feld III-7) extrem groß aus (Tab. 11). In den Drohnenaufnahmen wird die unterschiedliche Besonnung, insbesondere der beiden minimalen Felder (geklärt) deutlich. Das Feld III-1 profitiert im August von der Beschattung durch einen naheliegenden Baum, während III-7 der Nachmittagssonne ausgesetzt ist (Vgl. Abb. 43).

Die unbewässerte Bepflanzung erreicht deutlich geringere Maximalwerte von 63 % (am 14.10.; +24 % zum Vorjahr) und liegt damit 18 % unter MIN (geklärt) und sogar 37 % unter MAX (filtriert).

Ein Vergleich der Deckungsgrade bei filtrierter und geklärter Bewässerung gestaltet sich aufgrund der unterschiedlich starken Verschattungen und damit einhergehend der unterschiedlichen Entwicklung der Felder (unabhängig von der Bewässerungsmethode) als schwierig. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf mit einer größeren Anzahl an Forschungsfeldern. Dennoch lässt sich abschließend feststellen, dass sich die Bepflanzung mit filtriertem Grauwasser insgesamt gut entwickelt.

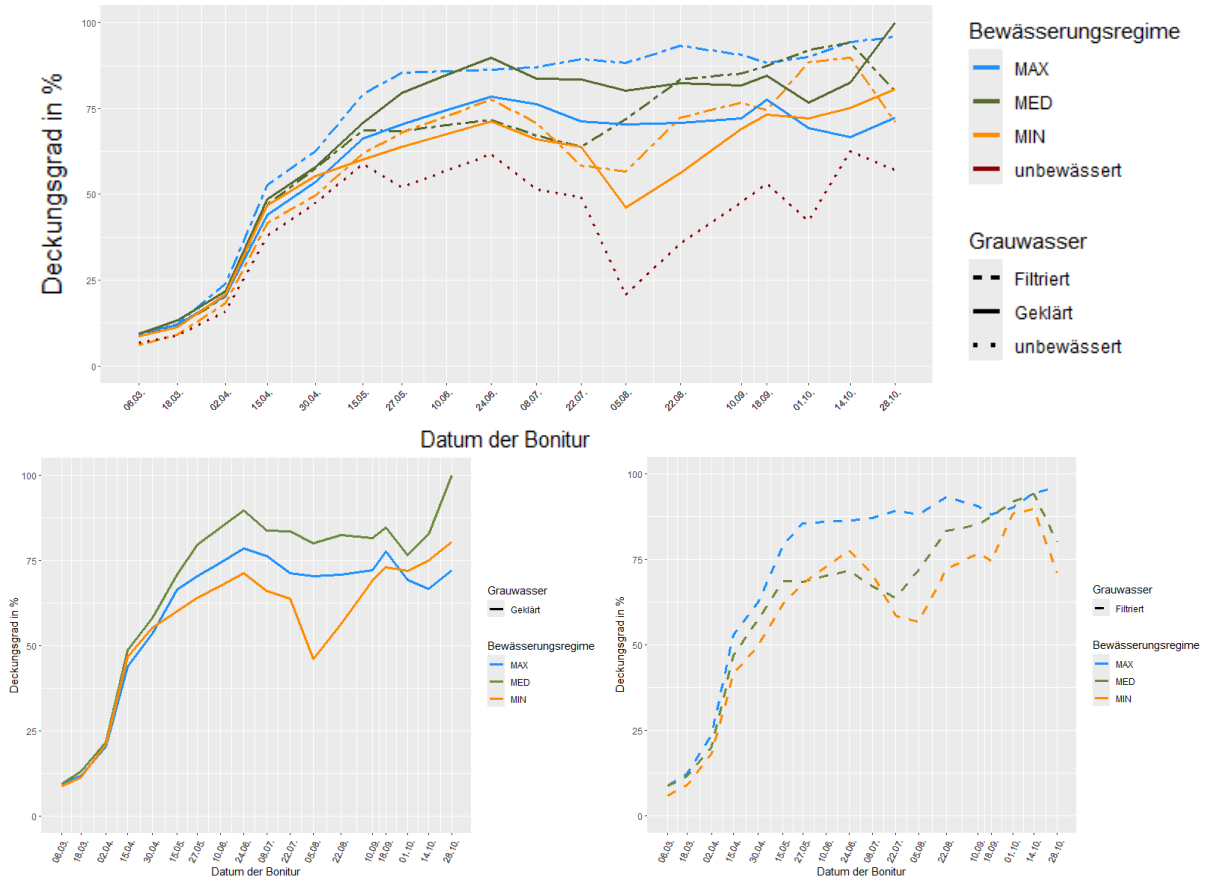


Abbildung 61: Mittlere Deckungsgrade aller Arten der Gruppe 3 in 2024 im Vergleich zur unbewässerten Referenzfläche sowie darunter die geklärte Bewässerung (links) und die filtrierte Bewässerung (rechts)

Tabelle 11: UAV-Aufnahmen inkl. Deckungsgrade der Felder mit geklärter Grauwasserbewässerung und filtrierter Grauwasserbewässerung im Gegensatz zur unbewässerten Referenzfläche am 05.08.2024 (Gruppe 3)

geklärt			**filtriert**		
MAX	**MED**	**MIN**	**MAX**	**MED**	**MIN**
70 %	80 %	62 % | 30 %	88 %	72 %	57 %
unbewässertes Referenzfeld mit gleicher Bepflanzung					
21 %					

Blattmenge, -größe und -gesundheit

Die Blattmenge, -größe und -gesundheit der Pflanzen wurde auf einer 9-stufigen Skala gemäß den Tabellen 12 bewertet. Um zunächst generelle Trends und bewässerungsbedingte Unterschiede im Pflanzenbestand sichtbar zu machen, erfolgt im ersten Schritt eine Betrachtung aller Arten übergreifend. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse anschließend artspezifisch differenziert dargestellt, um artspezifische Reaktionen auf die unterschiedlichen Bewässerungsregime hinsichtlich Blattmenge, -größe und -gesundheit gezielt herauszuarbeiten.

Tabelle 12: Skala Blattanzahl (links), Skala Blattgröße (mittig) und Skala Blattgesundheit (rechts); analog zu Tabelle 3 für Gruppe 1 und Tabelle 8 für Gruppe 2

Skala	Blattanzahl
1	Keine
2	
3	Wenige
4	
5	Normal viele
6	
7	Zahlreiche
8	
9	Sehr viele

Skala	Blattgröße
1	Sehr klein
2	
3	Klein
4	
5	Normal groß
6	
7	groß
8	
9	Sehr groß

Skala	Blattgesundheit
1	Krank
2	
3	Wenig gesund
4	
5	Mäßig gesund
6	
7	Gesund
8	
9	Sehr gesund

<u>Blattmenge</u>

Abgesehen von MAX (geklärt) zeigt sich, dass häufigere Wassergaben zu einer besseren Entwicklung der Blätter führen können. Somit besitzen die Pflanzen unter maximaler Grauwasserbewässerung (filtriert) gemäß des Bewertungsbogens normal viele bis zahlreiche Blätter (17.09.) und erreichen im Mittel eine über eine Stufe bessere Bewertung als MIN (filtriert). Der Unterschied zwischen MAX (filtriert) und MED (filtriert) beträgt weniger als eine Stufe (0,75 Einheiten). Mit sinkendem Wasserangebot Anfang Juni stagniert die Blattmenge beim minimalen Regime sowohl unter filtrierter als auch unter geklärter Bewässerung (im Mittel bei Stufe 4,5 = wenige bis normal viele Blätter) bevor sie ab Juli um eine Stufe auf 5,5 ansteigt. Die unbewässerte Pflanzung erreicht maximal Stufe 4,5 (wenige bis normal viele Blätter) und besitzt damit deutlich weniger Blätter als die bewässerte Vegetation. Zudem erfährt sie in den Sommermonaten einen merklichen Einbruch in der Blattmenge, von dem sich die Pflanzungen nur zögerlich wieder erholen. Zwischen MAX (filtriert) und der unbewässerten Pflanzung liegen im Hochsommer bis zu 2,8 Bewertungsstufen.

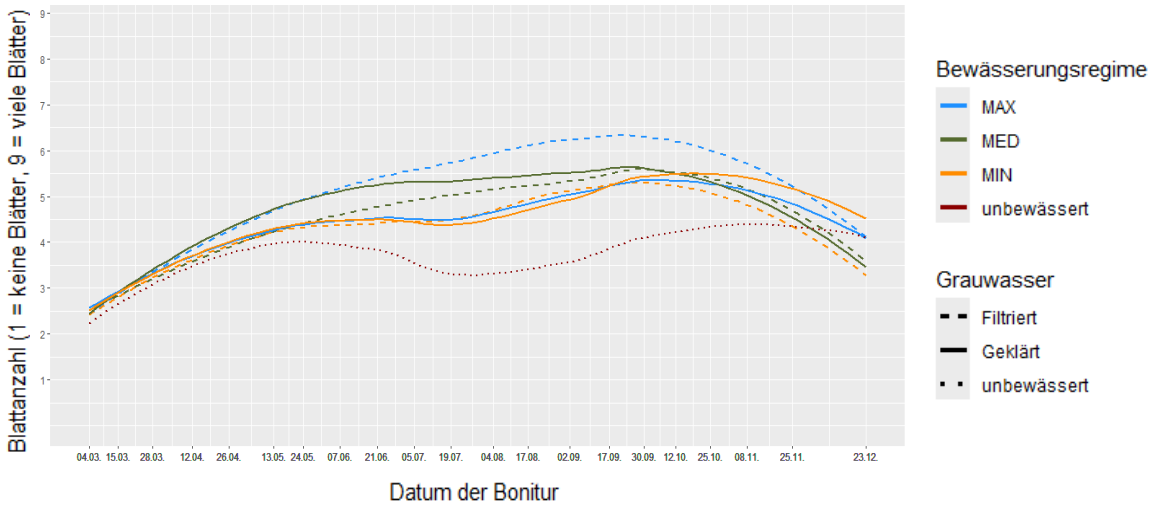


Abbildung 62: Mittlere Blattmenge aller Arten der Gruppe 3 in 2024.

<u>Blattgröße</u>

Die Blattgröße zeigt ein fast identisches Bild wie die Blattmenge. So erreicht MAX (filtriert) die Bewertungsstufe 6,2 (normal große bis große Blätter) und besitzt nicht nur die meisten, sondern auch die größten Blätter. MAX (geklärt) weißt analog zu den Parametern Wuchshöhe, Deckungsgrad und Blattmenge Entwicklungsdefizite aufgrund einer stärkeren Besonnung auf. Sowohl die medialen Regime (fitriert/geklärt) als auch die minimalen Regime (filtriert/geklärt) zeigen sehr ähnliche Werte. Unter medialer Bewässerung entstehen dabei größere Blätter (Stufe 5,7 bei MED (geklärt) entspricht normal großen Blättern). Das minimale Regime besitzt ebenso maximal normal große Blätter (Stufe 5,4). Auch bei der Blattgröße zeigt sich bei der unbewässerten Fläche im Hochsommer eine Minimierung in der Blattgröße. Während die maximal erreichte Bewertungsstufe 4,5 (klein bis normalgroß) erst recht spät in der Vegetationsperiode am 8. November erreicht wird, fallen die Blätter während der größten Hitze klein aus (Stufe 3,3 am 04.08.). Die Differenzen zwischen der unbewässerten und der maximal bewässerten Pflanzung (filtriert) sind am 17.08. mit 2,8 Bewertungsstufen am größten – selbst das minimale Regime (geklärt) erreicht eine über eine Stufe bessere Bewertung.

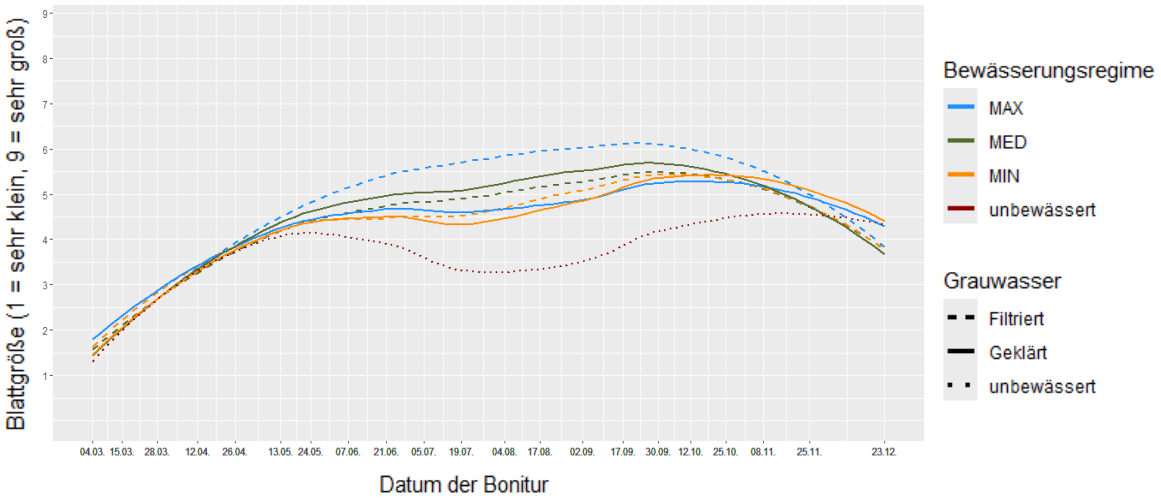


Abbildung 63: Mittlere Blattgröße aller Arten der Gruppe 3 in 2024.

Blattgesundheit

Bei der Blattgesundheit zeichnet sich ein nicht ganz eindeutiges Bild ab. Zu Beginn der Vegetationsperiode war die Blattgesundheit in allen Bewässerungsregimen am höchsten. In den Sommermonaten, mit dem Einsetzen der Wasserknappheit, war ein deutlicher Rückgang zu beobachten. Das mediale Regime unter geklärter Grauwasserbewässerung verzeichnete zunächst die beste Blattgesundheit (beste Bewertung Stufe 6,6; gesund), welche jedoch im Verlauf der Vegetationsperiode kontinuierlich abnahm, sodass am Ende nur noch wenig bis mäßig gesunde Blätter erfasst wurden (Stufe 3,8). Das Regime MAX (geklärt) besaß aufgrund der stärkeren Besonnung eine geringer Blattgesundheit als MED (geklärt). Auffällig zeigt sich zudem auch das Regime MAX (filtriert), dessen Pflanzen nicht nur die meisten und größten, sondern mitunter die gesündesten Blätter ausbildet. Die Blätter der unbewässerten Pflanzung, dessen Bewertung im Hochsommer bis auf Stufe 3,8 (wenig bis mäßig gesund; 19.07.) abfällt, leiden unter Trockenstress und zeigen die größten Defizite. Am 19.07. sind die größten Differenzen zwischen den Forschungsfeldern festzustellen: Der Unterschied in der Blattgesundheit zwischen der unbewässerten Vegetation und dem MIN-Regime mit geklärtem Grauwasser beträgt weniger als eine Stufe (0,75), zu MAX mit filtriertem Grauwasser (schattig) 1,4 Stufen und zu MED mit geklärtem Grauwasser (schattig) 1,75 Stufen.

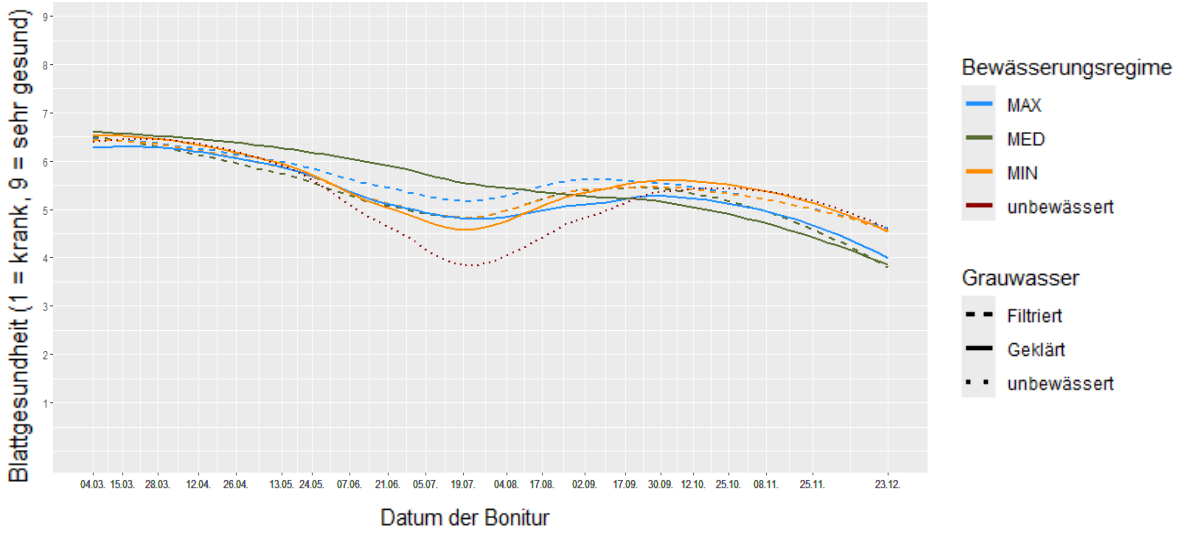


Abbildung 64: Mittlere Blattgesundheit aller Arten der Gruppe 3 in 2024.

Artspezifische Betrachtung

Alchemilla

Bei Alchemilla mollis zeigte sich bereits bei minimaler Bewässerung (geklärtes/filtriertes Grauwasser) ein deutlich positiver Einfluss auf die Blattentwicklung im Vergleich zur unbewässerten Kontrollgruppe: Die Zunahme der Blattanzahl und -größe lässt sich im Hochsommer sowohl für das geklärte als auch das filtrierte Grauwasser in etwa mit einer Verbesserung um bis zu 1,3 (bei der Blattgröße) bzw.1,5 (bei der Blattmenge) qualitative Stufen (am 04.08.2024) beschreiben (siehe Abb. 65). Der Unterschied der Blattmengen zwischen minimaler und maximaler Bewässerung fiel hingegen deutlich geringer aus (0,6

Stufen zwischen MIN (geklärt) und MAX (geklärt) sowie 0,9 Stufen zwischen MIN (filtriert) und MAX (filtriert) am 04.08.2024). Der Unterschied in der Blattmenge zwischen MIN (geklärt) und der am besten entwickelten Fläche – MED (geklärt) – beträgt ebenso 1,5 qualitative Stufen. Insgesamt lässt sich feststellen, dass A. mollis bereits bei geringer Grauwasserzufuhr ihr Blattwachstum signifikant steigert.

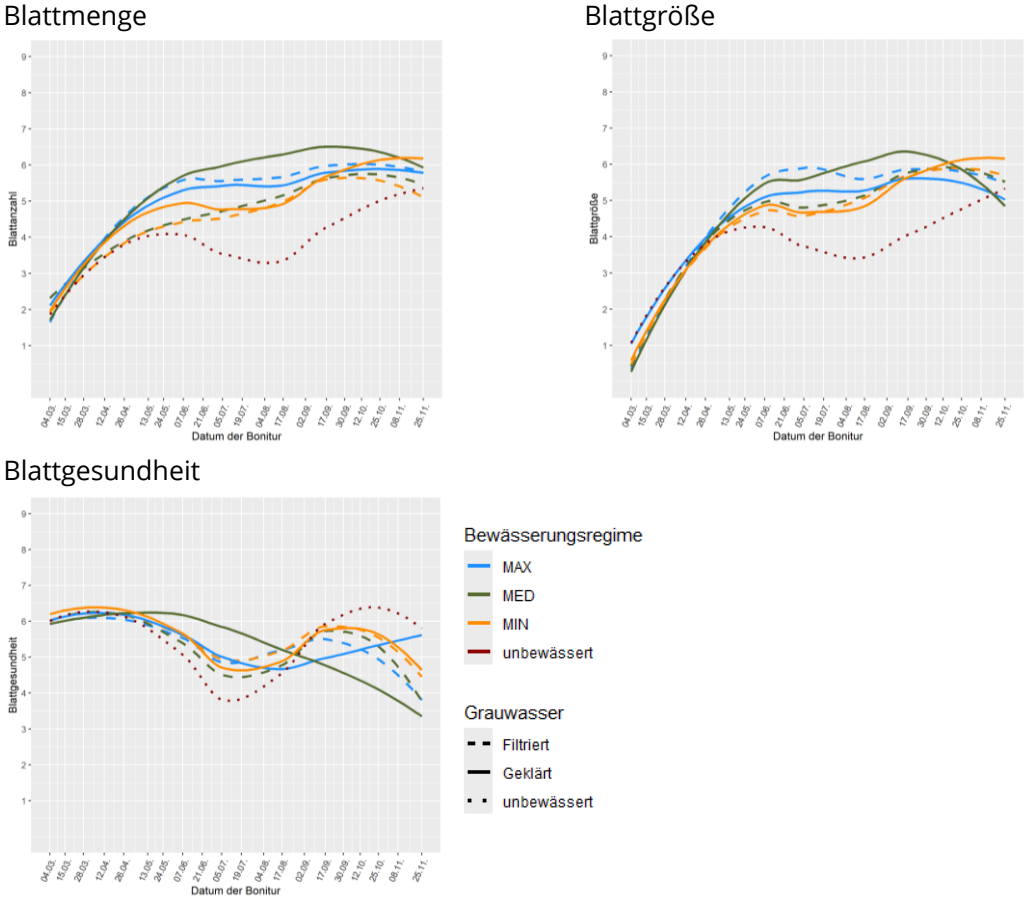


Abbildung 65: Blattmenge, -größe und -gesundheit der Alchemilla in der Gruppe 3 in 2024

Campanula punctata

Campanula punctata reagierte besonders im Hochsommer äußerst empfindlich auf Wassermangel. Die unbewässerten Pflanzen zeigten beginnend im Juni einen regelrechten Einbruch in der Blattentwicklung, mit einem Rückgang der Blattmenge um 1,8 Stufen im Vergleich zu MIN (geklärt) und 2,1 Stufen im Vergleich zu MIN (filtriert) (jeweils am 17.08.2024, Abb. 66). Demnach führte selbst die minimale Bewässerung zu einer deutlichen Erholung. Bei der filtrierten Grauwasserbewässerung sind im Hochsommer gemäß der Bewässerungsmenge Abstufungen in der Blattmenge und -größe zu erkennen. Allerdings verläuft dieser Anstieg nicht linear: Während das maximale Regime zum Höchstzeitpunkt am 17. August eine um eine Stufe höhere Bewertung erreicht als das mediale Regime, beträgt der Unterschied zwischen medialem und minimalem Regime lediglich 0,3 Stufen. Bei der Blattgröße und -gesundheit sind nochmals geringere Unterschiede zwischen den Regimen feststellbar. Diese Ergebnisse

unterstreichen den höheren Wasserbedarf dieser Art in Trockenperioden sowie eine leicht verbesserte Blattgesundheit in Abhängigkeit der Wasserverfügbarkeit.

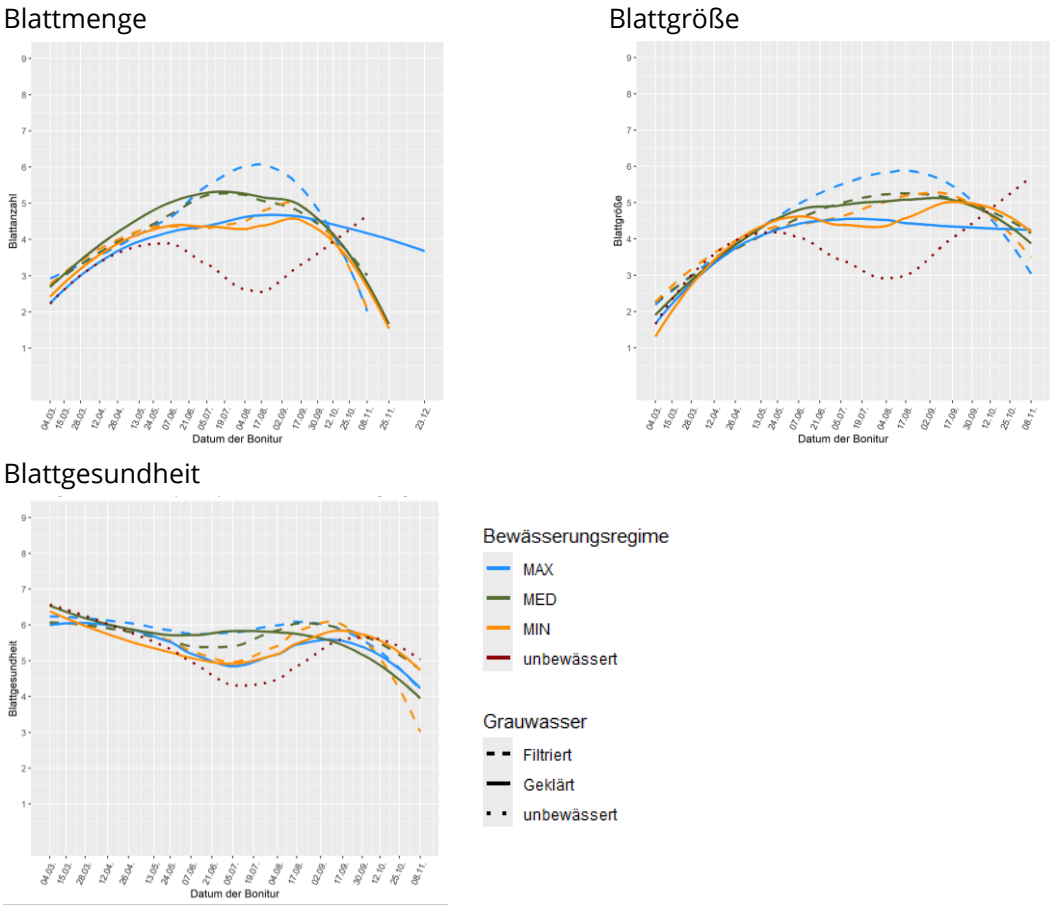


Abbildung 66: Blattmenge, -größe und -gesundheit der Campanula punctata in der Gruppe 3 in 2024

Campanula rotundifolia

Im Gegensatz zur C. punctata zeigte Campanula rotundifolia geringere Unterschiede zwischen den verschiedenen Bewässerungsregimen. Dennoch war vor allem bei filtrierter Grauwasserbewässerung ein konsistenter, positiver Effekt der Bewässerung auf Blattanzahl und -größe festzustellen. Während des Hochsommers ließ sich ein Anstieg der Blattmenge und -größe um mindestens eine Bewertungsstufe ausschließlich zwischen dem minimalen Regime und der unbewässerten Kontrollgruppe feststellen. Am 19. Juli 2024 erreichte die Blattgröße bei minimaler Bewässerung mit geklärtem Grauwasser eine Verbesserung um 1,0 Stufen im Vergleich zum unbewässerten Feld, während die entsprechende filtrierte Variante eine Zunahme um 1,1 Stufen aufwies. Zum selben Zeitpunkt betrug der Unterschied in der Blattmenge zwischen unbewässertem Feld und MIN (geklärt) ebenfalls genau eine Stufe. Alle anderen Regime liegen im Hochsommer näher beieinander. Sowohl bei geklärtem als auch filtriertem Grauwasser wurden bei der Art keine Auffälligkeiten festgestellt. Dabei deuteten sich leichte Vorteile für die filtrierte Variante hinsichtlich der Blattmenge und -größe an. Diese Ergebnisse sprechen für die gewisse Trockenheitstoleranz der Art bei gleichzeitig positivem Ansprechen auf zusätzliche Wassergaben.

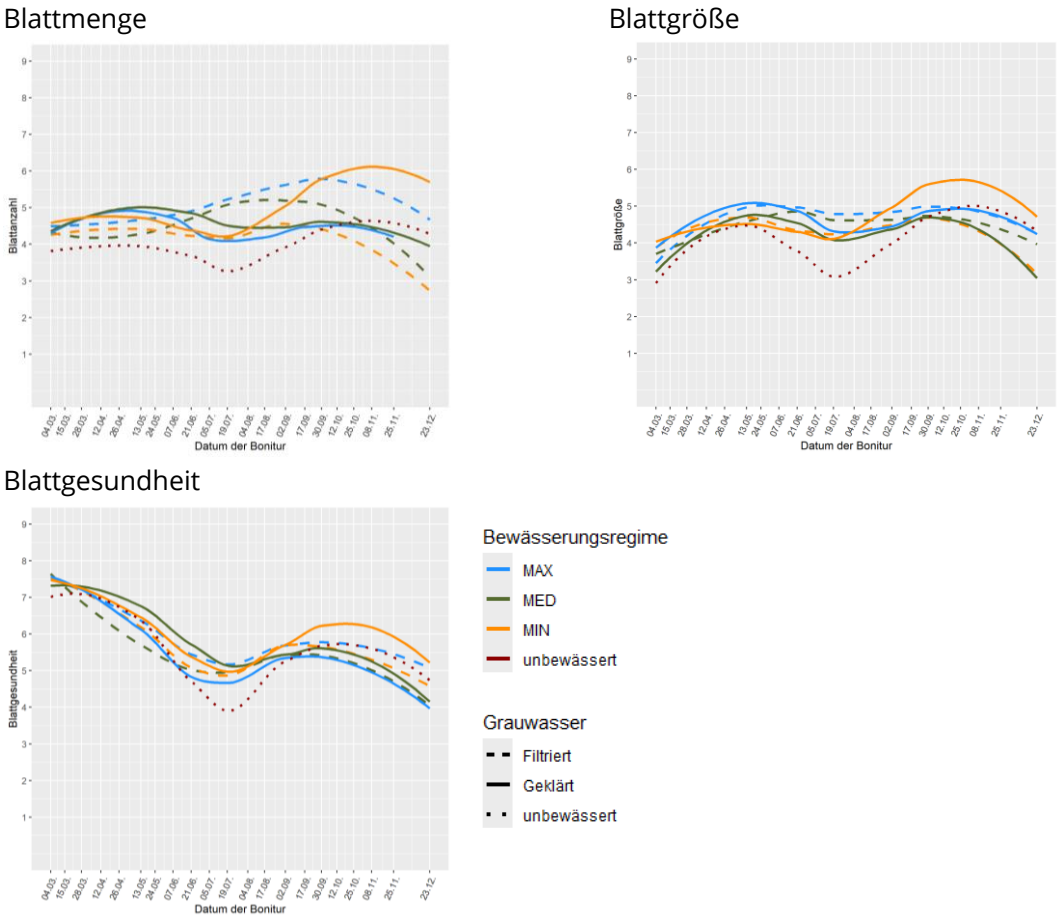


Abbildung 67: Blattmenge, -größe und -gesundheit der Campanula rotundifolia in der Gruppe 3 in 2024

Hemerocallis

Die Hemerocallis zeigte ebenfalls bereits bei minimaler Bewässerung eine Zunahme der Blattanzahl und -größe. Am 17. August, dem Zeitpunkt mit den größten beobachteten Differenzen zwischen den Bewertungsstufen, betrug der Abstand sowohl bei der Blattmenge als auch bei der -größe zwischen der unbewässerten Variante und der minimalen Bewässerung mit geklärtem Grauwasser 1,2 Stufen; bei filtriertem Grauwasser belief sich die Differenz auf 1,5 Bewertungsstufen. Der Effekt verstärkte sich jedoch zwischen minimaler und maximaler filtrierter Bewässerung nicht (maximal 1,2 Stufen Differenz zwischen MIN (filtriert) und MAX (filtriert) am 17.08.2024). Ein eindeutiger Vor- oder Nachteil einer der beiden Grauwasserarten konnte auch bei dieser Art nicht festgestellt werden, was auf eine gute Verträglichkeit beider Grauwasserqualitäten schließen lässt.

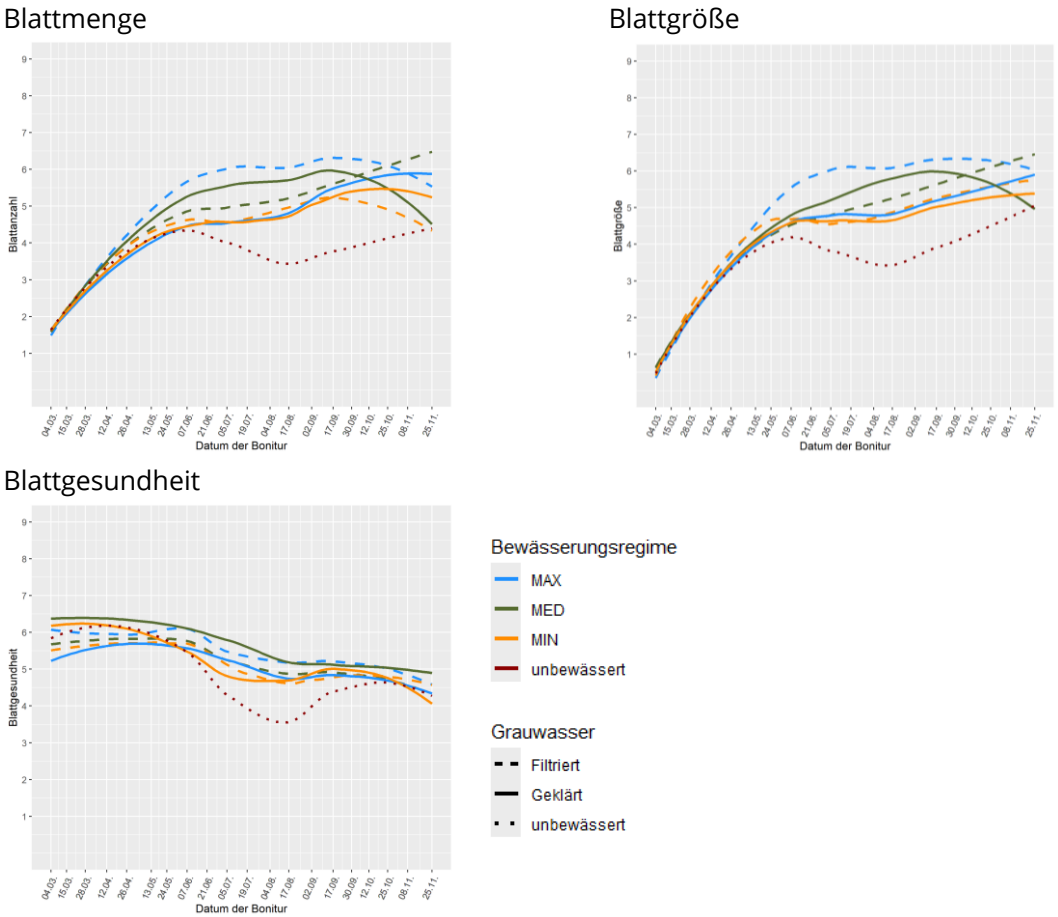


Abbildung 68: Blattmenge, -größe und -gesundheit der Hemerocallis in der Gruppe 3 in 2024

Knautia

Knautia macedonica profitierte hinsichtlich der Blattentwicklung stärker als andere Arten der Gruppe 3 von der Bewässerung mit filtriertem Grauwasser. Insbesondere ab Ende Juli war ein deutlicher Zuwachs in Blattanzahl und -größe unter den bewässerten Regimen zu verzeichnen, wobei die Effekte unter filtrierter Grauwasserbewässerung tendenziell ausgeprägter waren. Die größten Unterschiede in der Blattmenge traten zur Bonitur am 2. September auf: Die Blattmenge lag bei MIN (geklärt) 1,2 Stufen und bei MIN (filtriert) 2,0 Stufen über der unbewässerten Variante. Während der Anstieg innerhalb der filtrierten Regime von MIN zu MED lediglich 0,4 Bewertungsstufen betrug, stieg der Wert von MED zu MAX deutlich stärker um 1,2 Stufen. Diese Unterschiede könnten auf eine für die Art vorteilhaftere Nährstoffzusammensetzung im filtrierten Grauwasser hinweisen. Unbewässerte Pflanzen entwickelten sich sichtbar schwächer, mit verzögerter und reduzierter Blattbildung.

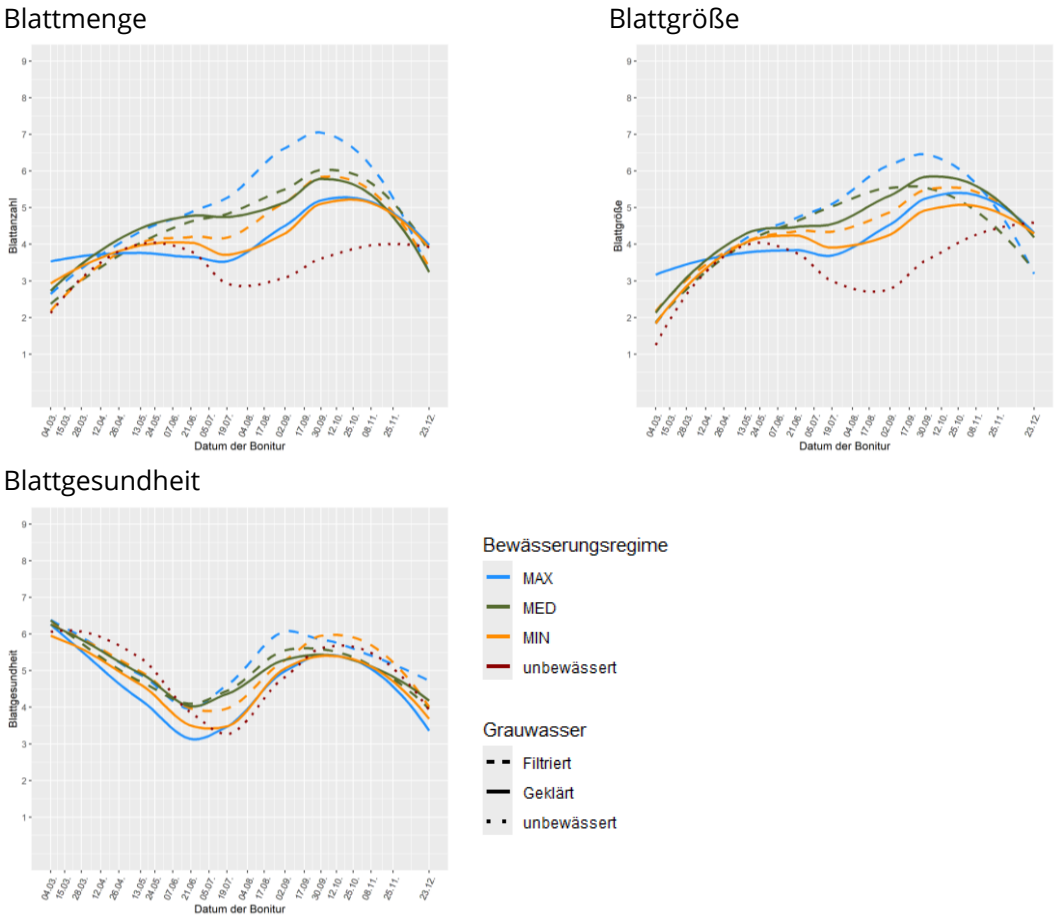


Abbildung 69: Blattmenge, -größe und -gesundheit der Knautia in der Gruppe 3 in 2024

Molinia

Molinia arundinacea reagierte sehr sensibel auf das Wasserangebot. Während unbewässerte Pflanzen eine deutlich eingeschränkte Blattentwicklung insbesondere hinsichtlich der Blattanzahl zeigten, führte auch bei dieser Art bereits eine minimale Bewässerung zu einer sehr deutlichen Zunahme in der Blattmenge während des Hochsommers (1,4 Stufen bei MIN (geklärt), 1,6 Stufen bei MIN (filtriert) am 17.08.2024). Zum gleichen Zeitpunkt erreichten MIN und MED unter filtrierter Bewässerung identische Bewertungsstufen, lagen jedoch 1,8 Stufen unter dem maximalen Regime. MAX (filtriert) erzielte den mit Abstand höchsten Wert und hob sich damit deutlich von den übrigen Varianten ab. Obwohl Molinia arundinacea eine trockenheitsverträgliche Art ist, profitierte sie stark von einer gesteigerten Wasserzufuhr, was für ein starkes Reaktionspotenzial bei Wassergabe spricht.

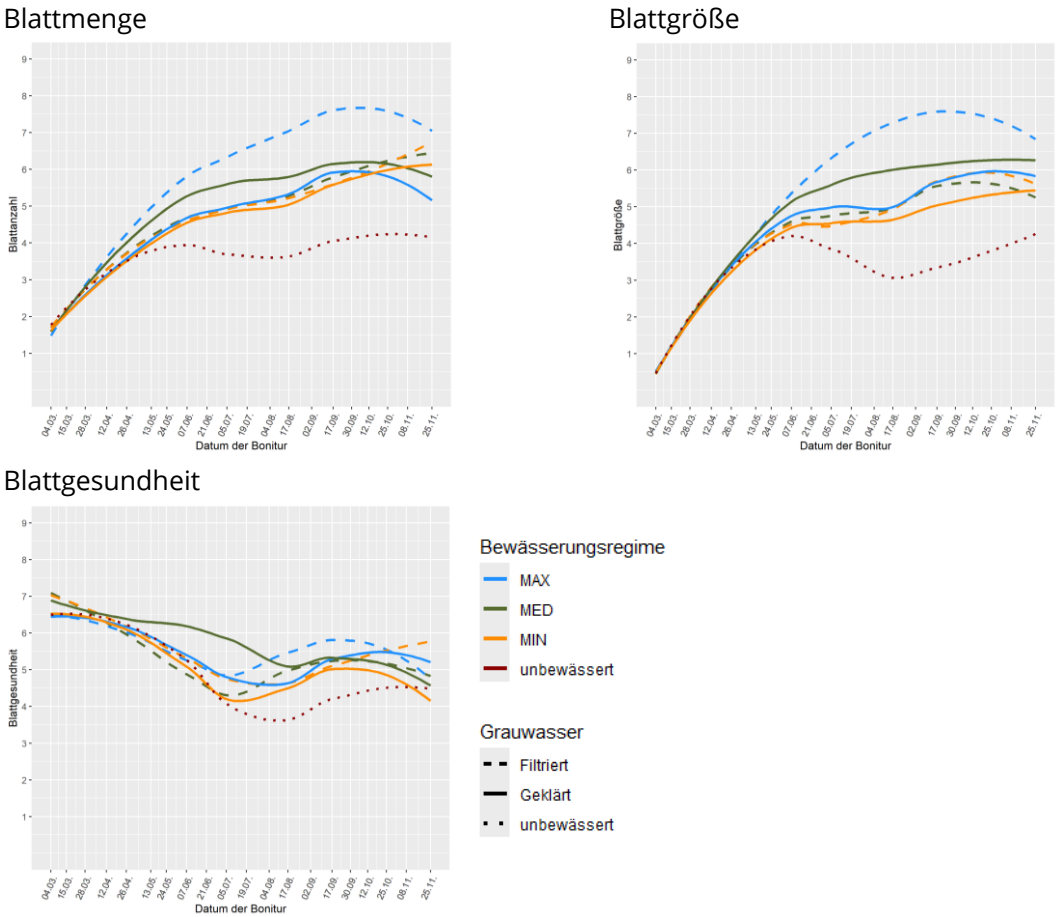


Abbildung 70: Blattmenge, -größe und -gesundheit der Molinia in der Gruppe 3 in 2024

4.3.5 Bewertung der unbewässerten Nebenflächen

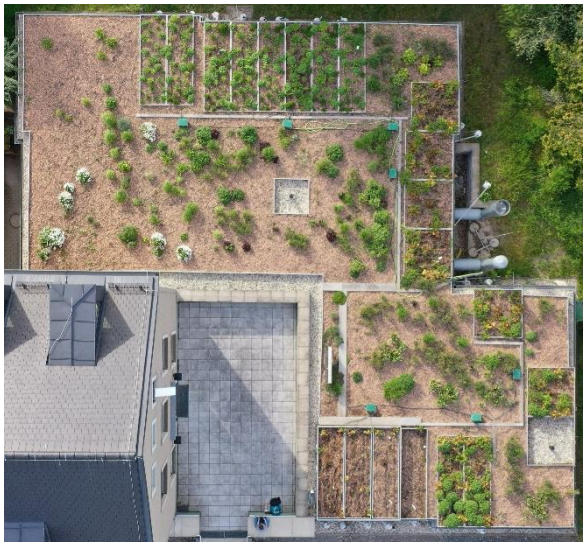
Die Grundbegrünung der Nebenflächen, die analog zu den bewässerten Forschungsfeldern mit einer Gesamtsubstratstärke von 24 cm ausgestattet sind, ist als Mischpflanzung mit Leit-, Begleit- und Füllstauden und -gräsern angelegt. Diese Flächen werden nicht bewässert. In der Artenzusammensetzung wurde das 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 Pflanzen der Nebenflächen waren im Vorjahr, bis zum 27. Mai 2022, als sehr vital einzuschätzen. Die stark steigenden Temperaturen und geringen Niederschläge im Juni 2022 führten jedoch zu erheblichem Trockenstress. Ab der Bonitur am 24. Juni 2022 sind bereits erhebliche Reaktionen der Pflanzen auf die klimatische Extremsituation zu beobachten gewesen. Ein Großteil der Pflanzen reagierte mutmaßlich mit frühzeitigem Einziehen. In den folgenden Bonituren war ein Fortschreiten der Reaktionen auf den anhaltenden Trockenstress zu sehen. Erst mit den allmählich sinkenden Temperaturen und einsetzenden Niederschlägen Ende August 2022 war ein erneutes Austreiben einiger Pflanzen wie

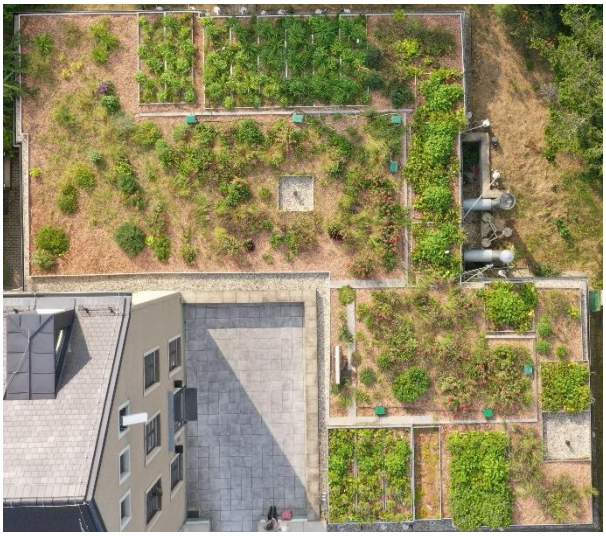
beispielsweise Allium schoenoprasum ‚Forescate' zu beobachten. Größtenteils war das grünere Gesamtbild bei der Bonitur am 16. September 2022 jedoch auf das Austreiben von Saatgut anderen Arten zurückzuführen. Der Unterschied in Vitalität und Ästhetik zwischen den als trockenheitsliebend geltenden Arten in den unbewässerten Nebenflächen zu den bewässerten Pflanzen in den Forschungsfeldern war als sehr hoch einschätzen. Das Drohnenfoto vom 26.06.2023 in Abbildung 71 zeigt, dass ein großer Teil der Bepflanzung auf den Nebenflächen in 2023 aufgrund des heißen Sommers 2022 ausgefallen ist. Die höhere Niederschlagsversorgung in 2023 und der 2. Jahreshälfte in 2024 im Gegensatz zu 2022 brachte einige Arten/Individuen wieder (siehe Drohnenfotos aus 2024 und 2025).

26.06.2023

30.04.2024



03.06.2025



Detailaufnahmen vom 26.06.2023

Detailaufnahmen vom 30.04.2024

Detailaufnahmen vom 03.06.2025

Abbildung 71: Bildvergleiche der Drohnenaufnahmen der unbewässerten Nebenflächen (Gesamtansichten in 2024 nur vom Frühjahr und Herbst vorhanden).

Eine im Mai 2025 durchgeführte Bestandsaufnahme der Pflanzen auf der Nebenfläche sollte Aufschluss bringen, welche Arten sich für eine ausfallarme unbewässerte Dachbegrünung eignen. In der Tabelle 13 ist erkennbar, dass ausgehend von den 26 initial gepflanzten Arten in 2020 im Mai 2025 noch 19 Arten (73 %) vorhanden sind. Lediglich 3 Arten haben sich vermehrt – besonders ausgeprägt war dies bei den Kräutern Origanum vulgare (Oregano; + 289 %) und Allium schoenoprasum (Schnittlauch; + 1.417 %). Nahezu alle übrigen Arten hatten einen starken Individuenverlust zu verzeichnen: Lediglich 2 Arten (Hemerocallis Hybride und Dianthus carthusianorum) haben einen Rückgang von weniger als 50 % erlitten. Bei 4 Arten (Sedum Hybride, Iris barbatanana, Heuchera Hybride

und Linum perenne) lag der Individuenverlust zw. 50 % und maximal 75 % und bei 7 Arten sogar über 75 % bis 99 %. Nochmals 7 Arten sind gänzlich ausgefallen. Ausgenommen von dieser Zählung sind die 3 Thymus-Arten, da aufgrund ihres flächigen Wuchses keine einzelne Individuenzahl aufgenommen werden konnte.

Von den 13 zusätzlich gepflanzten Arten in 2021, bei denen die Stückzahl nicht dokumentiert wurde, sind noch 6 Arten (46 %) vorhanden.

Tabelle 13: Artenliste der Pflanzungen auf den Nebenflächen sowie Änderung der Individuenzahlen seit 2020 (orange: Abnahme, grün: Zunahme), Stand: Mai 2025.

Botanischer Name	**Deutscher Name**	**Lebens-bereich**	**Ein-gesetzte Stückzahl**	**Stückzahl in 2025 / Ver-änderung zu 2020**
Initialpflanzung in 2020				
Acaena microphylla 'Kupferteppich'	Braunrotes Stachelnüsschen	St/FS/MFr1-2	51	**0** / - 100 %
Aster ericoides 'Snowflurry'	Teppich-Myrten-Aster	St/MK/FS/GR2	46	**5** / - 89 %
Centranthus ruber 'Rosenrot'	Spornblume	Fr/St/FS1-2	43	**65** / + 151 %
Dianthus carthusianorum	Karthäuser-Nelke	Fr/St/FS1	48	**31** / - 35 %
Epimedium x warleyense 'Orangekönigin'	Elfenblume	G2/GR2-3	13	**0** / - 100 %
Euphorbia griffithii 'Fireglow'	Himalaya-Wolfsmilch	Fr/FS1	14	**0** / - 100 %
Geranium 'Rozanne'	Storchschnabel	B2	19	**0** / - 100 %
Helictotrichon sempervirens 'Saphirsprudel'	Blaustrahlhafer	Fr/St/FS1	26	**1** / - 96 %
Hemerocallis Hybride 'Joan Senior'	Taglilie	B/Fr/GR2	14	**8** / - 43 %
Heuchera Hybride 'Black Beauty'	Garten-Purpurglöckchen	GR/Fr2	16	**6** / - 62 %
Hosta Hybride 'Brim Cup'	Funkie	G/GR2	13	**0** / -100 %
Hosta plantaginea 'Honeybells'	Lilien-Funkie	B/GR2-3	13	**2** / - 85 %
Iris barbatanana 'Orange Tiger'	Zwerg-Iris	St/B/Fr1	40	**17** / - 57 %
Lavandula angustifolia 'Dwarf Blue'	Garten-Lavendel	Fr/St/FS1/H1b	38	**6** / - 84 %
Linum perenne	Stauden-Lein	Fr/St/SH/FS1	52	**14** / - 73 %
Origanum vulgare	Echter Dost / Oregano	Fr/St/FS1	36	**104** / + 289 %
Perovskia atriplicifolia 'Little Spire'	Kleine Blauraute	Fr1	20	**4** / - 80 %
Phlox subulata 'Atropurpurea'	Polster-Phlox	St/MK/FS1-2	33	**0** /- 100 %
Phlox subulata 'Amazing Grace'	Polster-Phlox	St/MK/FS1	21	**0** / - 100 %
Sedum cauticola 'Bertram Anderson'	Purpur-Fetthenne	St/MK/FS/MK 1	35	**6** / - 83 %

Sedum Hybride 'Purple Emperor'	Purpur-Fetthenne	Fr/FS/B1	21	9 / - 57 %
Stachys grandiflora 'Superba'	Purpur-Ziest	GR/Fr2/B1	23	2 / - 91 %
Thymus doerfleri 'Bress. Seed'	Ornament-Thymian	St/MK/FS	36	2 Flächen
Thymus longicaulis ssp. Odoratus	Kaskaden-Thymian	St/FS/M1	30	2 Flächen
Thymus serpyllum 'Albus'	Weißer Sand-Thymian	St/FS/Fr/H1	35	3 Flächen
Allium schoenoprasum ‚Forescate'	Purpur-Schnittlauch	Fr/B1-2	30	**425** / + 1.417 %
Nachpflanzungen im Frühjahr 2021				
Anaphalis triplinervis	Perlörbchen Silberregen	Fr/FS/St1-2 / so	k. A.	1
Aster linosyris	Goldhaar-Aster	SH/Fr1 / so	k. A.	0
Calamintha nepeta	Bergminze	Fr/FS/St1 / so,as,hs	k. A.	21
Cerastium tomentosum	Hornkraut Silberteppich	Fr/St/MK1 / so	k. A.	0
Euphorbia cyparissias	Zypressen-Wolfsmilch	FS/Fr/St/GR1 / so	k. A.	0
Geranium sanguineum	Blut-Storchschnabel	GR/Fr/St/SH1 / so	k. A.	8 große + flächendeckend kleine
Iberis sempervirens	Immergrüne Schleifenblume „Schneeflocke"	St/FS/MK1 / so,as	k. A.	7
Koeleria glauca	Blaugrünes Schillergras	Fr/SH/St1	k. A.	10
Luzula nivea	Schnee-Hainsimse	GR2/G1-2 / hs,sc	k. A.	0
Melica ciliata	Wimper-Perlgras	St/FS/Fr/SH1 / so,as	k. A.	51
Pulsatilla vulgaris	Gewöhnliche Kuhschelle	SH/Fr/St1 / so	k. A.	0
Stipa capillata	Haar-Pfriemengras	Fr/FS/St/FS1 / so	k. A.	0
Teucrium chamaedrys	Edel-Gamander	St/FS/SF1-2 / so	k. A.	0

4.3.6 Fazit

Die Vitalitätsanalyse auf dem einfach-intensiv begrünten Forschungsgründach lieferte zentrale Erkenntnisse zur Wirkung der zwei unterschiedlichen Grauwasserqualitäten (mechanisch filtriert vs. geklärt) auf die Vegetationsentwicklung. Über die zwei Vegetationsperioden 2023 und 2024 hinweg wurden systematisch die Wuchshöhe, Individuenzahl, blühende Individuen, Deckungsgrad sowie Blattmenge, -größe und -gesundheit unter drei verschiedenen Bewässerungsregimen (minimal, medial, maximal) untersucht.

Insgesamt zeigte sich, dass beide Grauwasserqualitäten zur Erhaltung und Förderung der Pflanzenvitalität auf Gründächern geeignet sind. Die Bewässerung mit filtriertem Grauwasser wirkte sich in einigen Fällen tendenziell wachstumsfördernd und vitalitätssteigernd aus: Bistorta amplexicaule und Hemerocallis citrina zeigten bei filtrierter Grauwasserbewässerung größere Wuchshöhen. Dies deutet darauf hin, dass die Arten von den im filtrierten Grauwasser verbliebenen Nährstoffen profitieren. Bistorta blühte unter filtriertem Grauwasser tendenziell früher. Die Arten Campanula punctata, Campanula rotundifolia und Knautia macedonica bildeten unter filtrierter Grauwasserbewässerung, insbesondere im maximalen Regime, tendenziell mehr Blüten als bei geklärtem Grauwasser. Allerdings profitierten die drei zuletzt genannten Arten in den Sommermonaten von Verschattung durch umliegende Gehölze, was zusätzlich zur verstärkten Blütenbildung beigetragen haben dürfte. Bei Lysimachia punctata war eine leichte Tendenz zu mehr blühenden Individuen unter geklärter Grauwasserbewässerung erkennbar. Bei den übrigen Arten zeigten sich keine Unterschiede zwischen den beiden Grauwasserqualitäten.

Bei den Arten der Gruppe 2 und 3 konnten keine Individuenschwankungen oder -verluste verzeichnet werden, die auf eine Grauwasserbewässerung zurückzuführen sind. Brunnera macrophylla zeigte in beiden Jahren arttypische Schwankungen in den Individuenzahlen. Besonders in den minimal bewässerten Regimen hat die Art durch den lückigeren Bestand die Chance sich durch Versamung zu vermehren, was sich in den Individuenzahlen widerspiegelte. Die Art vertrug dabei filtriertes und geklärtes Grauwasser gleichermaßen gut. Bei Geranium x magnificum 'Rosemoore' kam es unabhängig von Grauwasserqualität zu Individueneinbußen, die auf Konkurrenzdruck durch die wuchsstarke Bistorta zurückzuführen sind. Ebenso wie die Brunnera besaß Geranium in den lückigeren Beständen bessere Wachstumschancen. In Gruppe 1, die aus Versuchsflächen mit einer gedrungenen Geometrie besteht, zeigten die Geranium ein besseres Wachstum, da sie einen größeren Abstand zur Bistorta hatten.

Auf dem unbewässerten Referenzfeld der Gruppe 3 zählen Alchemilla mollis, Hemerocallis citrina und Molinia arundinacea zu den stabilen Arten – ihre Bestände waren über den gesamten Beobachtungszeitraum konstant. Molinia blieb auf dem unbewässerten Feld jedoch deutlich kleiner als auf den Grauwasser-bewässerten Feldern. Die Arten Campanula rotundifolia, Campanula punctata und Knautia macedonica stellten während der heißen Trockenphasen ihr oberirdisches Wachstum vorübergehend teils vollständig ein, um physiologischen Trockenstress zu überdauern. Das Blattwerk wurde vollständig braun und die Arten zeigten entsprechend in dieser Phase keine Blütenentwicklung. Die Bestände aller Arten der Gruppe 3 stabilisierten sich jedoch wieder im Herbst. Blattmenge, -größe und -gesundheit nahmen im Hochsommer bei allen unbewässerten Arten im Vergleich zu den Grauwasser-bewässerten Pflanzen stärker ab. Die Ergebnisse zeigen auch, dass das Einziehen oberirdischer Pflanzenteile als Teils ihres

Überlebensmechanismus bereits mit der Minimalbewässerung von 0,6 L/m²/d Grauwasser (geklärt sowie filtriert) verhindert werden kann.

Ein maßgeblicher externer Störfaktor war der Dickmaulrüsslerbefall insbesondere in der Vegetationsperiode 2024. Dieser trat unabhängig von Grauwasserqualität oder -regime v. a. in Gruppe 1 und 2 auf und führte bei mehreren Arten zu Vitalitätsverlusten bis hin zum vollständigen Ausfall. Besonders betroffen waren Geranium, Lysimachia und Bergenia. Bistorta zeigte trotz Fraßspuren keine Ausfälle. In Gruppe 3 breitete sich der Dickmaulrüssler nur in sehr geringem Maße aus, sodass keine Pflanzen zu Schaden kamen. Es können keine belastbaren Aussagen zur Schädlingsresistenz der dort vertretenen Arten getroffen werden.

Auch die teils unterschiedlich starken Verschattungsbedingungen wirkten sich auf die Vitalität aus. Verschattete Flächen – vor allem in Gruppe 1 und 3 – zeigten in den Sommermonaten eine insgesamt bessere Entwicklung als vollsonnige Bereiche. Die unterschiedliche Verschattung erschwerte die direkte Vergleichbarkeit zwischen den Bewässerungsregimen.

Auf den nicht bewässerten mit trockenheitstoleranten Arten bepflanzen Nebenflächen, fiel der Bestand nach dem sehr heißen Sommer 2022 zunächst sehr lückig aus, erholte sich aber in den Jahren 2023 und 2024. Eine vollständige Bedeckung wurde jedoch zu keinem Zeitpunkt erreicht. Dieses führte zu einem hohen Aufwand der Entnahme von unerwünschten Beikräutern. Im Mai 2025 konnten zwar 73 % der in 2020 gepflanzten Arten festgestellt werden, allerdings sehr häufig mit deutlichen Individueneinbußen bis hin zu -verlusten. Drei Arten haben sich gegenüber dem Jahr 2020 vermehrt: besonders ausgeprägt war dies bei Allium schoenoprasum (Schnittlauch; + 1.417 %). Auch Origanum vulgare (Oregano; + 289 %) und Centranthus ruber 'Rosenrot' (Spornblume; + 151 %) vermehrten sich und besitzen daher einen hohen Verwendungswert für eine ausfallarme, unbewässerte, einfach-intensive Dachbegrünung. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass Allium sehr stark zum Einziehen neigt und daher die Flächen in trockenen Sommern kahl erscheinen.

Zusammenfassend belegt die Untersuchung, dass die getestete Artenauswahl der Gruppen 1 bis 3 auch bei der Bewässerung mit lediglich mechanisch filtriertem ebenso wie mit geklärtem Grauwasser eine hohe Vitalität entfalten kann. Insbesondere während heißer und trockener Sommermonate kann selbst mit einer Minimalbewässerung das Einziehen der Pflanzen verhindert sowie die Blühaktivität weitestgehend durchgängig erhalten werden. Diese Ergebnisse legen auch nahe, dass ggf. eine weitere Reduzierung der mit 0,6 L/m²/d bereits geringen Wassergaben für eine etablierte einfach-intensive Dachbegrünung möglich sein könnte.

Die gewonnenen Erkenntnisse bieten eine wertvolle Grundlage für die pflanzen- und standortgerechte Planung zukünftiger Gründächer und können zur Etablierung der Bewässerung mit ressourceneffizientem Grauwassereinsatz beitragen.

5. Automatisierung der Vegetationsaufnahme (Arbeitspaket 3)

5.1 Ziele und Vorhaben

Im Rahmen des Vorhabens wird ein Verfahren des maschinellen Lernens getestet und weiterentwickelt, dass eine automatisierte Klassifikation von Vegetation aus UAV-Aufnahmen erlaubt, um den Bedeckungsgrad von Dächern zu messen. Es werden photogrammetrisch 3D-Punktwolken berechnet, die neben der geometrischen Information verschiedene radiometrische Angaben enthalten. Diese Datengrundlage wird genutzt, um verschiedene geometrische Punktmerkmale (u.a. Punktdichte, Rauigkeit und Linearität) auf verschiedenen Beobachtungsskalen sowie radiometrische Merkmale (u.a. Vegetationsindizes) abzuleiten und für das Trainieren eines Klassifikators zu nutzen (z.B. Random Forest; u.a. bereits umgesetzt zur Rillendetektion in UAV-Aufnahmen von Ackerflächen: Malinowski et al., 2022).

Die UAV-Befliegungen erfolgten zu zwei verschiedenen Jahreszeiten, damit das variierende Erscheinungsbild von Vegetation beim Trainieren berücksichtigt werden kann. Es wurde eine Planung und Durchführung der Datenakquise auf niedrigen Flughöhen vorgenommen, um eine hohe räumliche Auflösung der Datenprodukte zu erreichen. Es wurden überlappende UAV-Bilder mittels einer Standardkamera aufgenommen, um hochaufgelöste Punktwolken zu berechnen. Zusätzlich wurde eine multispektrale Kamera eingesetzt, um Vegetationsindizes berechnen zu können, denn ihr Einsatz zur Vegetationsklassifikation von Punktwolken hat bereits erfolgsversprechende Ergebnisse gezeigt (Onnen et al., 2020).

5.2 UAV-Befliegung

Für das Projekt wurden UAV-Befliegungen durchgeführt, bei denen eine DJI Mavic M300 RTK eingesetzt wurde. Diese Drohne bietet neben der RTK-Fähigkeit – die in diesem Projekt nur eine untergeordnete Rolle spielte – durch ihr spezielles Befestigungssystem die Möglichkeit, zwei Sensoren simultan zu nutzen. Dies ermöglicht einen zügigen und synchronisierten Beflug.
Für die Datenerfassung wurden zwei Kameras verwendet:

- **DJI P1 Vollformat-Kamera:** Diese Kamera ist mit einem 35,9 x 24 mm großen Vollformatsensor ausgestattet und liefert Bilder mit einer Auflösung von 45 Megapixeln (8192 x 5460 Pixel). Die Pixelgröße beträgt 4,4 µm, was eine detailreiche Erfassung des Gründachs ermöglicht. Mit der 35-mm-Linse ergibt sich bei einer Höhe von 14 m eine Ground Sampling Distance (GSD) von 0.28 mm/Pixel, was eine hochpräzise Darstellung gewährleistet.
- **Micasense RedEdge Dual:** Diese Kamera deckt mit ihren zehn spektralen Kanälen ein erweitertes Spektrum ab, das sowohl sichtbares Licht (VIS) als auch den nahen Infrarotbereich (NIR) umfasst. Die abgedeckten Wellenlängen reichen von Coastal Blue (444 nm) bis zu Near-Infrared (865 nm) und beinhalten Kanäle wie Blue

(475 nm), Green (531 nm, 560 nm), Yellow (531 nm), Red (650 nm, 668 nm), Red Edge (705 nm, 717 nm) sowie Near-Infrared (840 nm, 865 nm). Die GSD bei 14 m Flughöhe liegt bei ca. 2,5 cm.

Die Vorbereitung der Befliegung wurde über den Remote Controller der M300 und der darauf aufgespielten Software DJI Pilot 10.1.5.10 durchgeführt. Über Wifi wurde dem Controller Zugang zum Internet gewährt, wodurch die Software einen Zugang zu dem öffentlich verfügbaren Kartenmaterial hat. Auf dieser Karte kann nun das Interessensgebiet (ROI) für die Befliegung definiert werden. Die gesamte Versuchsfläche wurde mit einem Polygon markiert und als Befliegungsgebiet markiert. Anschließend wurde das Befliegungsmuster eingestellt. Da der Luftraum durch das Haus und durch die anliegenden Bäume begrenzt ist, wurde eine einfache Streifenbefliegung mit Nadiraufnahmen durchgeführt. Die Überlappung in Längs- und Querrichtung des Bildverbandes wurde auf 80 % / 80 % gesetzt. Durch die Einschaltung der Höhenoptimierung in der Planungssoftware wurde nach der Befliegung ein Satz an Schrägaufnahmen vom letzten Standpunkt Richtung Mitte des ROI durchgeführt. Weitere Schrägaufnahmen wurden aus Platzgründen nicht aufgenommen.

Die Befliegungen wurden an drei Tagen in den Monaten 07-2023, 11-2023 und 06-2024 durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass auf den relevanten Beobachtungsfeldern möglichst wenig Schattenwurf entsteht. Um eine optimale Detailgenauigkeit in Abhängigkeit von der Entfernung zum Dach zu gewährleisten, wurden Befliegungen aus verschiedenen Höhen (40 m, 30 m, 20 m und 14 m) durchgeführt. Da die Befliegung in 06-2024 durch die umstehenden Bäume gestört wurde, wurde diese Befliegung von einer Minimalhöhe von 17 m durchgeführt. Zur Positionierung der Bilder im Weltkoordinatensystem wurden individuell zu jedem Zeitpunkt Passpunkte ausgelegt (Abb. 72) und mit einem Emlid Reach RS2 im RTK-Modus mit einer Genauigkeit von 1 cm eingemessen.

Für die Auswertung wurden ausschließlich Bilder im Modus der niedrigsten Flughöhe (14 m bzw. 17 m) zur Weiterverarbeitung verwendet, da die Passpunkte hier die nötige Genauigkeit lieferten, um die Punktwolken zu generieren und die Bilddaten im Raum präzise zu orientieren.

Abbildung 72: Beispielaufnahme mit ausgelegtem Passpunkt

5.3 Generierung der digitalen Oberflächenmodelle

Zur geometrischen Auswertung und dem anschließenden Ableiten von geometrischen Größen muss eine Orientierung der Bilder im Raum erfolgen, um durch die Triangulation von Bildpaaren ein digitales Oberflächenmodell (DOM) zu generieren. Ein weiteres zentrales Problem ist die Einführung einer Skalierung, welcher allein durch Bildinformationen nicht abgeleitet werden kann. Beides kann aber nach dem Structure from Motion (SfM) Verfahren gelöst werden (Eltner et al., 2020).

Die Verarbeitung der aufgenommenen Bilder erfolgt mithilfe der Software *Metashape (v1.8.3)*. Dabei werden die Bilddaten zunächst in einem künstlichen Koordinatensystem orientiert und positioniert. Dies geschieht durch die Erkennung homologer Verknüpfungspunkte in überlappenden Bildbereichen, wodurch benachbarte Bilder zueinander ausgerichtet werden. Diese Punkte dienen als Beobachtungen, um mithilfe der Bündelblockausgleichung (BBA) die relative Orientierung des Bildverbandes herstellen zu können. Weiterhin werden die eingemessenen Passpunkte in den Bildern gemessen und in die BBA eingeführt, um eine absolute Orientierung im Weltkoordinatensystem der Passpunkte durchzuführen und damit auch die Skalierung zu bestimmen. Als Ergebnis der BBA liegen alle Positionen und Orientierungen der Bilder vor.

Auf Grundlage der Verknüpfungspunkte wird eine dünn besetzte Punktwolke im Zuge der BBA berechnet. Dies geschieht durch Triangulation der Verknüpfungspunkte im zweidimensionalen Bild über die bekannte Orientierung und Position der Bilder in den dreidimensionalen Raum. Um diese Punktwolke weiter verdichten zu können, werden

jeweils zwei benachbarte Bilder genutzt und über den Bildraum hinweg Bildkorrespondenzen gesucht und trianguliert. Die dadurch erhaltene Punktwolke ist entsprechend der Bodenauflösung der Kamera dicht besetzt und bildet den Bildinhalt entsprechend aufgelöst in 3D ab.

Der gesamte Prozess wird separat für die RGB-Bilder und die Multispektralbilder durchgeführt, wodurch zwei unterschiedliche Punktwolken entstehen. Die RGB-Punktwolke zeichnet sich durch eine höhere Punktdichte und einen höheren Detaillierungsgrad aus, ideal für visuelle und geometrische Analysen. Im Gegensatz dazu bietet die Multispektral-Punktwolke (MS-Punktwolke) zwar weniger Punktdichte (ca. viermal geringer), liefert jedoch zusätzliche spektrale Informationen, die besonders für Vegetationsanalysen und die Bestimmung materialabhängiger Eigenschaften notwendig sind.

Die Rekonstruktion der Punktwolken verlief in den Epochen 07-2023 und 11-2023 überwiegend lückenlos. In der Epoche 06-2024 allerdings wiesen die Flächen FIII.1 – FIII.8 größere Lücken bei der Rekonstruktion auf (Abb. 73). Diese Lücken scheinen vor allem darauf zurückzuführen zu sein, dass die betroffenen Flächen eine relativ dünn bewachsene Vegetation mit Gräsern aufweisen, während die im Vergleich dazu buschartigen Pflanzen mit großen Blattflächen auf den anderen Versuchsflächen vollständig rekonstruiert wurden. Dadurch wird das Matching bei der Verdichtung der Punktwolke erschwert. Eine Veränderung der Befliegungsparameter, vor allem dem Flughöhenanstieg von 3 m, scheint keinen Einfluss zu haben, da andere Flächen mit der gleichen Qualität rekonstruiert wurden wie in den vorangegangenen Epochen.

Abbildung 73: RGB Punktwolken der jeweiligen Messepochen für Fläche FIII.3

5.4 Punktwolkenprozessierung

Die Punktwolken werden zunächst manuell mit dem Tool *CloudCompare* auf den Bereich des Gründachs zugeschnitten. Beide Punktwolken liegen mit einer Standardabweichung von etwa 1 cm im gleichen Koordinatensystem. Dadurch ist es wahrscheinlich, dass beide Punktwolken mit einem signifikanten Offset systematisch auseinander liegen. Um diesen Offset zu minimieren, werden dabei die Methode der Grobregistrierung und der Feinregistrierung mittels Iterative Closest Point (ICP) verwendet. Mit der ersten Methode

werden in beiden Punktwolken gleiche Punkte gesucht. Über diese Punkte werden Beobachtungsgleichungen aufgestellt, die durch die Schätzung von Translations-, Rotations- und Skalierungsparametern in einer vermittelnden Ausgleichung den Punktabstand zueinander minimiert. Der ICP nutzt hingegen alle (oder einen Teil) der beweglichen Punktwolke, sucht Korrespondenzen in der Referenzpunktwolke und bestimmt über die Minimierung der Abstände zwischen den korrespondieren Punkte die Transformationsparameter. Der ICP hat den Vorteil, dass im Gegensatz zur ersten Methode der Fehlereinflusseinfluss der manuellen Punktsuche sowie der Punktauflösung minimiert wird. Allerdings setzt diese Methode eine hinreichend genaue Grobregistrierung aus, um richtige Korrespondenzen zu finden.

Die Registrierung der MS-Punktwolke auf die RGB-Punktwolke erfolgt demnach jeweils intra-epochal mittels Feinregistrierung. Aufgrund der geringen Auflösung konnte keine laterale Verschiebung korrigiert werden. Lediglich der Höhenoffset wurde mittels ICP korrigiert. Dies hatte allerdings nur eine geringe Korrektur von im Mittel 4 mm zur Folge.

Die Epochen untereinander haben aufgrund der GNSS-Koordinatenmessung der Passpunktkoordinaten eine zufällig relative Verschiebung untereinander. Um dies zu kompensieren, wurde die erste aufgenommene Epoche 07-2023 als fix betrachtet und die anderen darauffolgenden Epochen auf diese Epoche transformiert. Dazu wurde die Gitterstruktur der Dachterrasse genutzt, um eine laterale Verschiebung und Verdrehung zu schätzen. Die Terrasse als reguläre Ebene wurde genutzt, um den Höhenunterschied anzupassen. Die laterale Verschiebung wurde mittels Grobregistrierung durchgeführt. Ein ICP zur Feinregistrierung wurde angeschlossen. Die dadurch erreichte hohe relative Genauigkeit ermöglicht eine sehr gute Überlagerung der zu betrachtenden Einzelgebiete.

Im Anschluss können die einzelnen Versuchsflächen automatisch extrahiert werden. Dazu werden Polygone auf der XY-Ebene definiert. Alle Punkte, die sich in einem dieser Polygone, projiziert auf die XY-Ebene, befinden, werden dem jeweiligen Gebiet zugeordnet und als zusammenhängende Textdatei extrahiert.

Die Einzelpunktwolken werden weiterhin manuell nachbearbeitet, indem Punkte, die weit unter oder über der Fläche liegen, manuell entfernt werden. Die Punktwolke wird zudem auf eine Punktweite von 5 mm heruntergerechnet, um die anschließenden Berechnungen durch Elimination redundanter Informationen beschleunigen zu können und auch eine gleichmäßige Abtastung der Fläche für die spätere Abschätzung des Bedeckungsgrades zu gewährleisten.

5.5 Klassifizierung

Zur Trennung der Vegetation vom übrigen Umfeld (z. B. Boden oder Sensorartefakte) wird eine semantische Klassifikation durchgeführt. Für die Klassifikation der Punktwolken im Hinblick auf Pflanzen wird der Random-Forest-Algorithmus (Breimann, 2001) eingesetzt. Dieser Algorithmus aus dem Bereich des maschinellen Lernens erstellt basierend auf

einem Datensatz, der aus gelabelten Klassendaten und zugehörigen Merkmalsvektoren besteht, eigenständig einen Regelsatz. Mit diesem Regelsatz lassen sich anschließend ungelabelte Daten mit denselben Merkmalsvariablen zuverlässig klassifizieren.

In der vorliegenden Anwendung wurden komplette Versuchsflächen Punkt für Punkt in die Kategorien "Vegetation" und "Nicht-Vegetation" eingeteilt, wobei jedem Punkt ein Klassenattribut (1 für Nicht-Vegetation, 2 für Vegetation) zugewiesen wurde. Diverse Sensorik und Bauten wurden ebenfalls der Klasse 1 zugeordnet. Diese gelabelten Daten dienten als Grundlage für das Training des Klassifikators.

Zur Erzeugung der Trainingsdaten wurden dabei zwei Arten von Bepflanzung berücksichtigt. Zum einen existieren Flächen mit punktueller sehr junger Bepflanzung (Typ 1) sowie Flächen mit großer, flächendeckender Bepflanzung (Typ 2). Es wurden zwei Beete der ersten Art und zwei Beete der zweiten Art gelabelt, welche für das Training herangezogen wurden (Abb. 74). Um das Training validieren zu können, wurden zwei weitere Flächen gelabelt. Diese entsprechen einem Typ 2 Beet, wobei eine der Flächen abgestorbene Vegetation enthält. Da es die einzige Fläche war, welches abgestorbene Vegetation behielt, wurde es den Validierungsdaten zugeordnet, um die Qualität der Klassifikators in dieser Hinsicht testen zu können.

Der Random Forest beruht auf Entscheidungsbäumen, die jeweils individuell anhand eines zufällig generierten Subset an Punkten und einer zufälligen Auswahl an Merkmalen eine binäre Unterteilung des von den Merkmalen aufgespannten Merkmalsraumes durchführt. Punkte der gleichen Klassenzugehörigkeit bilden dabei Cluster in diesem Merkmalsraum, sodass die Aufgabe des Klassifikators besteht, sinnvolle Grenzen zwischen diesen Clustern auszubilden. Der einzelne Entscheidungsbaum vollzieht dies, indem er anhand der Trainingsdaten eine lineare Grenze zwischen den Clustern anhand des Merkmals durchführt, welches die Cluster möglichst „rein“ auftrennen kann. Da dies durch mögliche Überlagerung der Cluster nicht zu 100% beim ersten Split durchführbar ist, kann dieser Baum entsprechend tief wachsen, indem durch die Teilung entstandene Unterregionen des Merkmalbaumes wieder entlang eines Merkmals mit der größten möglichen „Reinheit“ geteilt wird. Dies kann so lange durchgeführt werden, bis der Baum eine maximale Anzahl an Teilungen durchgeführt hat oder die entstandene Unterregion des Merkmalraumes bereits nur Punkte einer Klasse enthält. Der Random Forest bildet in sich mehrere dieser Entscheidungsbäume, die durch die zufällige Auswahl an Datenpunkten und ausgewählten Merkmalen unabhängig zueinander sind. Bei der Klassifikation eines Datenpunktes durchläuft dieser Datenpunkt alle diese Entscheidungspunkte und erhält die Klasse, welche von den meisten Entscheidungsbäumen bestimmt wurde. Dies ermöglicht eine qualitativ bessere Klassifikation im Vergleich zu einem einzelnen Entscheidungsbaum und ist mitunter einer der besten Klassifikatoren im Punktwolkenbereich.

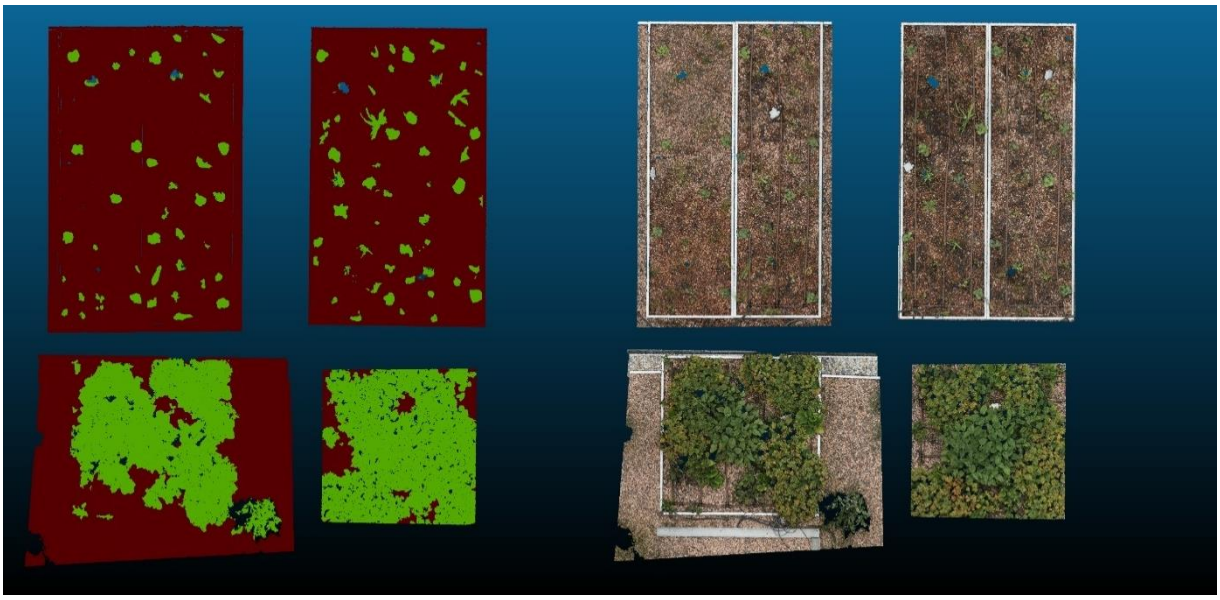


Abbildung 74: Gelabelte Punktwolken als Vegetation (grün) und Nicht-Vegetation (braun). Rechts sind die gleichen Punktwolken als RGB dargestellt.

5.6 Auswahl der Merkmale und Trainingsparameter

Für die Klassifikation werden geometrische und radiometrische Merkmale abgeleitet. Dank den interpolierten Micasense Informationen liegen die radiometrischen Informationen bereits vor. Durch einen Aufnahmefehler konnten nicht alle Epochen radiometrisch kalibriert werden, wodurch die Verwendung der einzelnen Kanäle nicht fehlerfrei möglich ist. Daher ist die Verwendung von entsprechenden Indizes, die ein Verhältnis aus einzelnen Kanälen bilden und dadurch den Kalibriereinfluss minimieren, zweckmäßig. Im Fall der Vegetationsklassifikation bietet sich der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) an. Dieser verwendet einen Rot-Kanal (Kanal 6) und einen NIR-Kanal (Kanal 10), um die Differenz zu bilden. Da Vegetation als Signatur einen Red Edge, also eine geringe Reflektanz im Rot Bereich und eine hohe Reflektanz im NIR Bereich, aufweist, lässt sich damit Vegetation besonders gut klassifizieren.

$$NDVI = \frac{NIR\text{-}R}{NIR+R}$$

Weiterhin werden geometrische Merkmale betrachtet, die aus der Nachbarschaft der Einzelpunkte abgeleitet werden. Einzelpunkte, repräsentiert als X, Y und Z Koordinate, besitzen allein keine Information über die Oberfläche, auf der sie liegen. Um nun diesem Punkt ein Merkmal zuzuordnen, welches die darunterliegende Oberfläche repräsentiert, müssen die Nachbarpunkte des Einzelpunktes mit einbezogen werden, um anhand der Lage und Ausrichtung dieser Punktgruppe eine Aussage über Beschaffenheit der Oberfläche aussagen zu können. Zu diesem Zweck werden je Einzelpunkt nacheinander (i) die Einzelpunkte und die Nachbarpunkte in einem definierten Radius aufgesammelt, (ii) der Schwerpunkt dieser Gruppe gebildet und die Kovarianzmatrix ermittelt und anschließend (iii) mittels Hauptkomponentenzerlegung die Hauptrichtungen und Eigenwerte der Punktgruppe ermittelt. Die Hauptrichtungen stehen senkrecht aufeinander und richten sich entsprechend den größten, zweitgrößten und drittgrößten

Varianzen in dieser Gruppe aus. Die Eigenwerte bilden hierbei das Maß der Varianz aus. Setzt man diese Eigenwerte in entsprechende Verhältnisse zueinander, können beispielsweise linienhafte, flächenhafte oder volumetrische Objekte als Merkmal verschlüsselt werden und zur Klassifikation nutzbar gemacht werden. Zu den Eigenschaften, die berechnet werden, gehören die Summe der Eigenwerte, Omnivarianz, Eigenentropie, Anisotropie, Planarität, Linearität, Oberflächenvariation, Sphärizität, Vertikalität sowie PCA1 und PCA2. Die Merkmale werden über das Python-Paket jakteristics berechnet. Genauere Informationen zu den einzelnen Merkmalen können unter (Weinmann et al. 2017, Grothum et al., 2023) nachgelesen werden. Die Merkmale sind sensitiv zu den ausgewählten Radien, die zur Auswahl der Nachbarschaftspunkte ausgewählt werden, da größere Radien meist komplexere Strukturen beinhalten als unter einem kleineren und beschränkteren Radius. Da die Objekte und Flächen in diesem Fall recht klein sind, wurden sich für Radien von 5 cm, 10 cm und 15 cm entschieden.

Für das Training eines Random Forest ist ein Satz von Parametern nötig, um die Ausprägung der Einzelbäume und des Forest als Ganzes zu gestalten. Zum einen ist die Anzahl an Einzelbäumen ein wichtiger Parameter, da zu wenige Einzelbäume zur Unteranpassung neigen, d.h. der Klassifikator ist zu einfach für die ihn gestellte Klassifikationsaufgabe. Weiterhin spielt die Tiefe der Einzelbäume eine Rolle. Eine zu geringe Tiefe führt wiederum zur Unteranpassung. Es werden verschiedene Kombinationen dieser beiden Parameter trainiert, um den optimalen Klassifikator zu trainieren. Der Parameter Baumanzahl beinhaltet die Werte 100, 150 und 200, der Parameter Baumtiefe 4 und 8. Die Anzahl an Merkmalen, die zur Generierung eines Einzelbaumes zufallsbasiert gezogen werden, setzt sich aus der Wurzel der Gesamtanzahl der Merkmale zusammen. Als Teilungskriterium wird der Gini Faktor genutzt.

Es werden zwei verschiedene Gruppen von Trainingsmerkmalen untersucht. Es wird dabei (i) nur der NDVI als Kriterium genutzt und (ii) der NDVI mitsamt den geometrischen Merkmalen genutzt. Es wird dabei untersucht, ob die geometrischen Merkmale das Ergebnis des NDVI weiter verbessern können und somit der Rechenaufwand gerechtfertigt ist oder ob die alleinige Nutzung des NDVI für die Klassifikation ausreichend ist.

Eine weitere Rolle spielt die räumliche Korrelation von benachbarten Punkten innerhalb der Punktwolken. Diese Punkte werden höchstwahrscheinlich einen sehr ähnlichen Merkmalsvektor besitzen. Wenn nun der Klassifikator trainiert wird, werden die Datenpunkte in Trainingsdaten und Validierungsdaten aufgeteilt. Eine zufällige Einteilung der Daten führt dazu, dass beide Datensätze nicht räumlich getrennt sind und dadurch eine Aussage über die Qualität verzerrt. Daher wird eine Einteilung entsprechend den Flächen durchgeführt und für eine Parameterkombination mehrere Modelle trainiert (kFold-Kreuzvalidierung). Es werden die vier Trainingsflächen aufgeteilt und jeweils drei der Flächen dem Training zugeführt und die übrig gebliebene Fläche wird nicht trainiert,

allerdings wird darauf der Test durchgeführt, wie gut der trainierte Klassifikator bereits auf ungenutzten Daten funktioniert. Die Zuordnung der Trainings- und Testdaten wird erneuert, sodass alle Flächen mindestens einmal als Testdatensatz genutzt wurden. Unter den trainierten Modellen wird jenes genutzt, welches am besten abschneidet.

Die beiden Merkmalskombinationen wurden trainiert und jeweils eine Modellkombination erzeugt. Tabelle 14 zeigt die verschiedenen Trainingseinstellungen für das Training nur mit (i) NDVI (unteren drei Zeilen) und dem Training mit (ii) NDVI und geometrischen Eigenschaften. Der mittlere Testwert, das ist in diesem Fall den Quotienten von Fehlklassifikation zur Gesamtanzahl an Punkten im Testdatensatz bildet, liegt bei allen Klassifikatoren ähnlich bei 94% - 96%. Die steigende Baumtiefe bei Gruppe (ii) hat einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit mit einer Verdopplung der Trainingszeit. Die Anzahl der trainierten Einzelbäume hat keinen Einfluss auf die Genauigkeit.

Tabelle 14: Trainingsparameter und Kennwerte zum Training von drei verschiedenen Trainingseinstellungen. Die unteren drei Zeilen beziehen sich auf das Training nur mit NDVI, die anderen beiden Gruppen beziehen sich auf das Training mit NDVI und den geometrischen Eigenschaften.

Mittlere Trainingszeit [min]	maximale Baumtiefe	Anzahl Bäume	mittlerer Testwert
7.69	4	100	0.94
10.94	4	150	0.94
14.31	4	200	0.94
15.1	8	100	0.96
20.74	8	150	0.96
28.39	8	200	0.96
2.85	8	100	0.94
4.25	8	150	0.94
5.49	8	200	0.94

Die Klassifikation der zurückgehaltenen Flächen, die keinen Eingang in das Training gefunden haben, wurden mit dem besten Klassifikator der Gruppe mit NDVI und den geometrischen Eigenschaften und mit dem Klassifikator der Gruppe nur mit NDVI klassifiziert. Die Abbildung 75 zeigt das Ergebnis der Klassifikation in Form von Konfusionsmatrizen. Bei der Erstellung der Konfusionsmatrix werden die manuellen Label je Punkt mit dem Label der Klassifikation verglichen und als Zählung an entsprechende Stelle in der Matrix gezählt. Ein richtig bestimmter Vegetationspunkt wird beispielsweise links oben in die Zeile „Truth label – Vegetation“ und Spalte „Predicted label – Vegetation eingeordnet“. Folglich werden richtig sortierte Nicht-Vegetationspunkte rechts unten in die Matrix sortiert. Sollten Fehlklassifikationen auftauchen, werden diese entsprechend ihrem Ergebnis auf der Nebendiagonale platziert. Die Werte in der Abbildung können als Prozentzahlen aufgefasst werden, die sich auf die True label beziehen, also auf die Summe der Reihen der Matrix. Die Matrizen sind in diesem Fall recht ähnlich, es gibt lediglich Unterschiede von 2% in der Non-Vegetationsspalte. Beide Klassifikatoren funktionieren demnach gleich gut. Die Klassifikatoren haben alle

vorhandenen Vegetationspunkte richtig klassifiziert. Die Non-Vegetationspunkte wurden lediglich zu 36 % erkannt und überwiegend der Vegetation zugewiesen. Das Ergebnis wird hierbei von der Auswahl der Testdaten vordergründig beeinflusst. Es wurden zwei Flächen für den Test ausgewählt, wobei eine Fläche den Eigenschaften der Trainingsdaten entspricht. Die andere Fläche hingegen weist die bereits erwähnte Tote Vegetation auf, die aufgrund ihrer Seltenheit und der damit verbundenen Validierungsmöglichkeit nicht mit trainiert wurde.

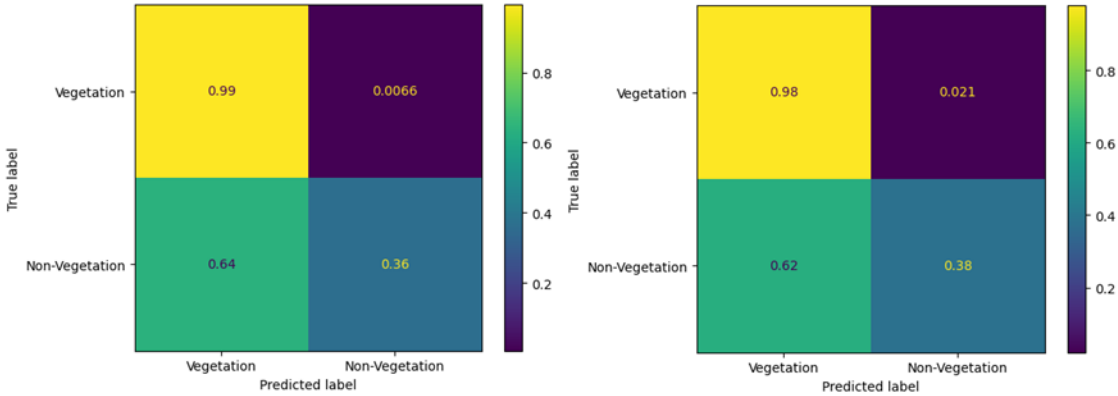


Abbildung 75: Konfusionsmatrix für die Klassifikatoren NDVI + geometrische Eigenschaften (links) und nur NDVI (rechts)

Die Ähnlichkeit des Ergebnisses lässt sich anhand der sogenannten Feature Importance in Abbildung 76 erklären. Sie gibt an, wie stark sich die Reinheit im Mittel bei einem Split an beliebiger Stelle in einem Entscheidungsbaum bildet, wenn dieses Feature genutzt wird. Es zeigt sich, dass der NDVI hier eine dominante Rolle einnimmt und wohl häufig genutzt wird. Bei den geometrischen Eigenschaften werden vor allem Features genutzt, die Variationen in alle drei Richtungen, also voluminöse Objekte abbilden, zur Unterscheidung der Klassen genutzt. Da aber der NDVI im Vergleich zu den anderen Merkmalen häufig genutzt wird, lässt sich daraus aussagen, dass zum einen der NDVI als besonders gutes Attribut zur Klassifikation gehandelt werden kann. Die relevanten geometrischen Eigenschaften bestimmen hierbei nur die Nuancen von 2 %. Zum anderen kann auf die Nutzung der geometrischen Eigenschaften mit geringen Genauigkeitsverlusten verzichtet werden.

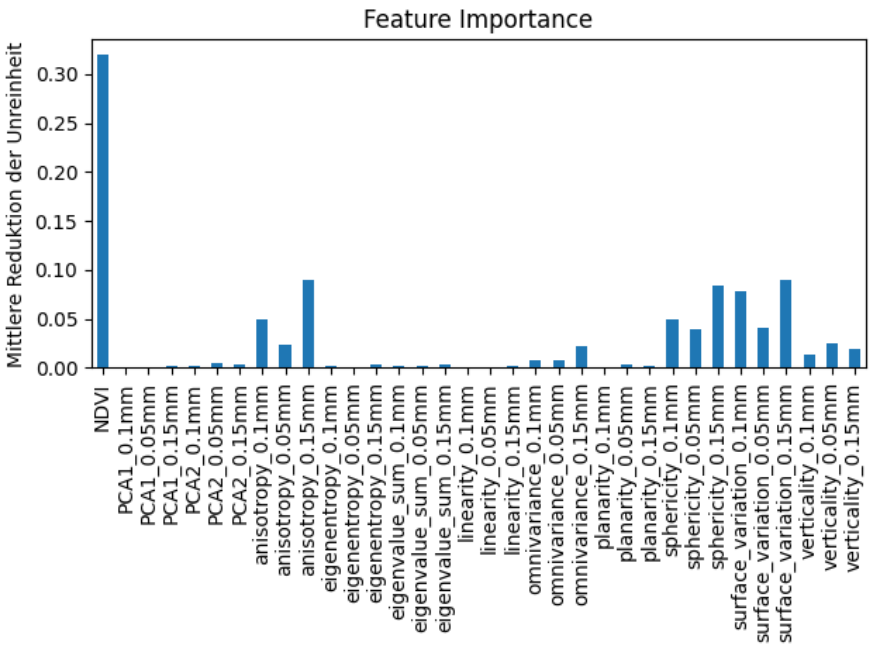


Abbildung 76: Feature Importance des Klassifikators mit NDVI und geometrischen Eigenschaften

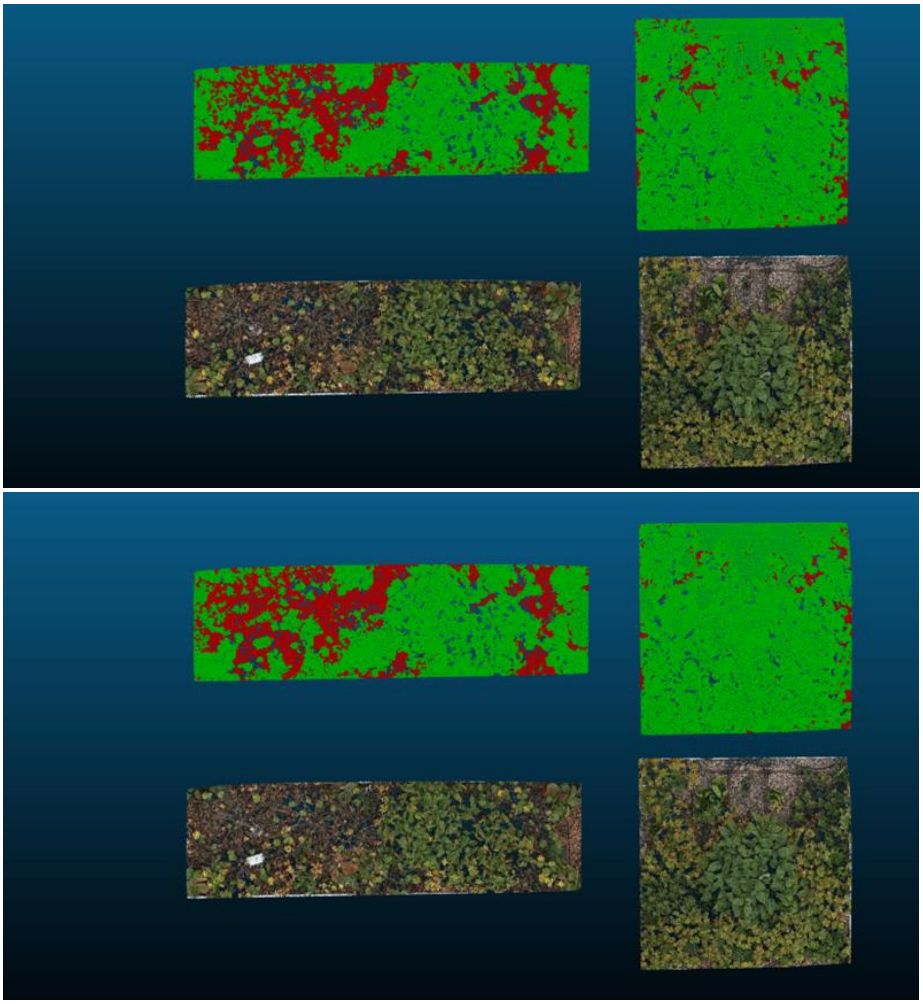


Abbildung 77: Klassifikationsfehler des Klassifikators "NDVI" (oben) und "NDVI + geometrische Merkmale" (unten). Die Farbe Grün steht für die richtige Klassifikation, die Farbe braun steht für eine Fehlklassifikation. Zur optischen Einschätzung wurden die RGB Punktwolken jeweils darunter gelegt.

In der Abbildung 77 wird das Klassifikationsergebnis dargestellt. Die Grünen Punkte stehen für richtig klassifizierte Punkte, die braunen hingegen für falsch klassifizierte Punkte. Die quadratische Fläche ist jeweils zu 92 % bzw. 95 % (Klassifikator NDVI / Klassifikator NDVI + geometrische Merkmale) richtig klassifiziert. Die linke Fläche, welche die abgestorbenen Pflanzen enthält, weist vor allem im Bereich der abgestorbenen Pflanze Fehlklassifikationen auf. Hier beträgt die richtige Klassifikation nur 64 % / 68 %. Ein Training auf diesen Daten kann auch diesen Fall mit aufnehmen und für eine Genauigkeitssteigerung sorgen. Eine Validierung lässt sich aber mit nur einem auftreten nicht durchführen.

5.7 Auswertung

Mithilfe des NDVI Klassifikators wurden nun über alle Epochen hinweg alle relevanten Untersuchungsflächen klassifiziert. Zur Bestimmung des Bedeckungsgrades wurden die Vegetationspunkte ins Verhältnis der Gesamtzahl der Punkte auf der Fläche gesetzt.

Tabelle 15: Bedeckungsgrade der einzelnen Flächen

	Monat		
Bezeich-nung	**07-2023**	**11-2023**	**06-2024**
FIII.8	4.19 %	24.13 %	51.31 %
FIII.7	7.80 %	47.52 %	58.28 %
FIII.6	9.10 %	51.17 %	67.32 %
FIII.5	7.43 %	47.01 %	64.45 %
FIII.4	7.14 %	36.75 %	72.19 %
FIII.3	9.81 %	53.00 %	77.84 %
FIII.2	8.15 %	52.22 %	86.72 %
FIII.1	8.82 %	42.51 %	75.80 %
FII.7	89.16 %	96.77 %	87.87 %
FII.6	87.58 %	93.28 %	84.68 %
FII.5	84.01 %	91.05 %	70.90 %
FII.4	91.82 %	96.62 %	83.68 %
FII.3	78.07 %	90.11 %	78.59 %
FII.2	86.39 %	92.39 %	80.18 %
FI.6	90.28 %	94.80 %	96.84 %
FI.5	92.00 %	95.05 %	95.85 %
FI.4	69.83 %	85.52 %	22.03 %
FI.3	86.82 %	71.82 %	44.18 %
FI.2	90.94 %	63.68 %	40.88 %
FI.1	92.89 %	67.86 %	35.47 %

Tabelle 15 zeigt die berechneten individuellen Bedeckungsgrade für die einzelnen Flächen je Messepoche. Es bilden sich hierbei drei Wachstumsgruppen aus. Gruppe 1 (Fl.1 – Fl.4) sind Flächen, die zunächst stark begrünt, allerdings im Verlauf der Messkampagne durch den Schädlingsbefall mit Dickmaulrüsslerlarven an Vegetation abgenommen hat. Gruppe

2 (Fl.4 – FII.7) sind in ihrer Bedeckung weitestgehend groß geblieben. Gruppe 3 (FIII.1 – FIII.8) haben aufgrund ihrer kompletten Neupflanzung im Juli 2023 entsprechend zugenommen.

Versuchsweise wurde die Pflanzenhöhe in Form eines Punktattributes berechnet. Dazu wurde manuell eine Ebene je Einzelfläche in den umliegenden sowie aufliegenden Bodenpunkten eingepasst. Zu dieser Ebene wurde der vertikale Abstand für jeden Punkt berechnet und als Punktattribut in CloudCompare erzeugt. Dies gelang entsprechend gut für alle Versuchsflächen, die Reduktion der Höhe auf einen Wert ist allerdings nicht zielführend, da mehrere Pflanzen auf den Flächen für gewöhnlich vertreten sind und sich entsprechend individuell entwickeln.

Tabelle 16: Bestimmung der summierten Vegetationsvolumen je Versuchsfläche in m³

	Monat		
Bezeich-nung	**07-2023**	**11-2023**	**06-2024**
FIII.8	0.001 m^3	0.016 m^3	0.142 m^3
FIII.7	0.003 m^3	0.038 m^3	0.150 m^3
FIII.6	0.004 m^3	0.040 m^3	0.272 m^3
FIII.5	0.003 m^3	0.042 m^3	0.210 m^3
FIII.4	0.003 m^3	0.021 m^3	0.243 m^3
FIII.3	0.005 m^3	0.055 m^3	0.366 m^3
FIII.2	0.004 m^3	0.044 m^3	0.453 m^3
FIII.1	0.004 m^3	0.029 m^3	0.297 m^3
FII.7	0.206 m^3	0.317 m^3	0.917 m^3
FII.6	0.203 m^3	0.656 m^3	0.629 m^3
FII.5	0.186 m^3	0.624 m^3	0.446 m^3
FII.4	0.142 m^3	0.257 m^3	0.453 m^3
FII.3	0.169 m^3	0.234 m^3	0.458 m^3
FII.2	0.175 m^3	0.166 m^3	0.385 m^3
FI.6	0.202 m^3	0.211 m^3	0.807 m^3
FI.5	0.191 m^3	0.206 m^3	0.817 m^3
FI.4	0.009 m^3	0.002 m^3	0.009 m^3
FI.3	86.82 %	71.82 %	44.18 %
FI.2	90.94 %	63.68 %	40.88 %
FI.1	92.89 %	67.86 %	35.47 %

Die erhaltenen relativen Höhen der Einzelpunkte wurden zudem verwendet, um Pflanzenvolumen zu bestimmen. Die Punktaufnahme von Oben wirkt sich hier nachteilig aus, da die Pflanzen somit nur von oben gemessen und somit nur die Oberfläche der Pflanzen im Allgemeinen ermittelt wurde. Für eine annähernd optimale Schätzung des Pflanzenvolumens wird daher angenommen, dass die Pflanze von der Oberfläche bis zum Boden vollständig durch einen Quader approximiert werden kann. Die Berechnung wird auf der gerasterten Punktwolke (Punktabstand = 1 cm) durchgeführt. Daraus ergibt sich

eine quadratische Grundfläche von 0,5 x 0,5 cm mit einer Quaderhöhe, die der relativen Höhe am jeweiligen Punkt entspricht. Zur Bestimmung des Volumens werden nur Punkte, die zur Vegetation gezählt wurden, herangezogen. Die Volumen der bestimmten Quader werden aufaddiert, um ein Gesamtvolumen der Vegetation pro Versuchsfläche zu ermitteln. Die Ergebnisse können in Tabelle 16 entnommen werden.

5.8 Fazit

Die Verwendung der Drohne zur Befliegung des Versuchsfeldes konnte erfolgreich implementiert werden. Die Befliegung mit einer Flughöhe von 14 bis 17 m ermöglichten eine hinreichend aufgelöste Aufnahme und entsprechend detaillierten Rekonstruktion der Einzelversuchsflächen. Probleme gibt es hierbei noch bei der Rekonstruktion von dünn besetzter Vegetation und Gräsern, die die Rekonstruktion mittels SfM erschwert und im schlimmsten Fall lückenhafte Abdeckungen erzeugt. Um diesem Problem entgegenzuwirken, kann die Verwendung von Laserscannern in Betracht gezogen werden. Künftige Arbeiten sollten eine Laserscannerbefliegung zusätzlich durchführen, um einen Vergleich hinsichtlich der Abdeckung und Qualität anstellen zu können. Weiterhin können auch handgehaltene Systeme in Betracht gezogen werden, die die Versuchsflächen aus unmittelbarer Distanz aufnehmen können. Dies ist insofern auch günstiger, wenn die Pflanzen durch Konstruktionen abgeschattet werden und daher aus der Vogelperspektive nicht aufgenommen werden können.

Die Klassifikation der Flächen führten zu einer erfolgreichen Trennung von Vegetation und dem Rest, sind aber abhängig von den Trainingsdaten, die dem Training zugeführt werden. So konnte gezeigt werden, dass abgestorbene Pflanzen, die nicht im Training vorkamen, entsprechend schlecht vom Rest unterschieden werden konnten. Eine Aufnahme dieser Flächen sind also sinnvoll, wurde aber in diesem Rahmen nicht durchgeführt, da keinerlei Möglichkeit der Validierung aufgrund des Einzelereignisses gegeben war. Weiterhin gab es kleinere Klassifizierungsfehler, die insbesondere im Übergangsbereich von Pflanze zu Boden zu beobachten waren. Eine Verwendung eines Klassifikators aus dem Deep Learning Bereich (beispielsweise PointNet++ ()) kann eine bessere Klassifikation durchführen und sollte dahingehend getestet werden, ob die reine Geometrie zur Klassifikation nutzbar ist oder ob wieder Multispektraldaten oder auch einfache RGB-Daten der Klassifikation zur Genauigkeitssteigerung zugeführt werden sollten.

Die automatisierte Ableitung des Bedeckungsgrades wurde ab der fertigen Berechnung der digitalen Oberflächenmodelle in Form von Python Skripte implementiert. Einige manuelle Methoden wie das Extrahieren von Ausreißern stehen einem vollautomatisierten Workflow im Weg und sollten künftig in weiteren Skripten als Funktionen implementiert werden. Künftige Arbeiten sollten zudem einen Fokus auf die Ableitung weitere Parameter, wie beispielsweise das Pflanzenvolumen, setzen.

Die Bestimmung des Vegetationsvolumens entspricht der beobachtbaren Pflanzenentwicklung. Allerdings ist diese abhängig von dem Klassifikationsergebnis sowie einer lückenlosen Abtastung der Pflanze, welches erneut die Notwendigkeit der Verbesserung dieser Aspekte hervorhebt. Zudem zeigen sich in der genaueren Betrachtung auch negative Höhen, die die Volumenbestimmung negativ beeinflussten. Diese resultieren durch falsch klassifizierte Bodenpunkte sowie Vegetationspunkte, die nah am Boden liegen. Um das Ergebnis zu verbessern, sind andere Methoden, beispielsweise eine Voxelisierung (Repräsentation der Punkte als kleine Würfel) der Punkte und anschließende Volumenbestimmung dieser Voxel erforderlich (vgl. Li und Liu, 2019). Dazu ist allerdings eine detailliertere Abtastung der Pflanze von Nöten.

5.9 Abschließender Methodikvergleich zur Ermittlung des Deckungsgrads

Die kontinuierliche Überwachung und Quantifizierung des Deckungsgrads von Dachflächen ist entscheidend für die Beurteilung und Optimierung von Dachbegrünungssystemen. Das vorliegende Kapitel widmet sich der Frage, welche Methode zur Quantifizierung des Deckungsgrades geeignet ist, um eine fundierte Einschätzung der Dachbegrünungssituation zu ermöglichen. Für dessen Beantwortung wird die Methodik der Juniorprofessur für Geosensorsysteme, welche ein Verfahren maschinellen Lernens auf Basis dreidimensionaler Punktwolken (siehe Kapitel 5.1) benutzt, mit der fotografischen/bildbasierten und damit gänzlich manuellen Bestimmungsmethodik der Professur für Landschaftsbau (siehe Kapitel 4.1) verglichen. Ziel dieser Untersuchung ist es, die Eignung beider Ansätze für eine präzise und vor allem effiziente Erfassung des Deckungsgrads unter Berücksichtigung des Zeitaufwandes zu bewerten.

Da die Befliegung des Forschungsgründachs von der Junior-Professur an drei einzelnen Zeitpunkten in 2023 und 2024 vorgenommen wurde, während die Professur für Landschaftsbau ihre Drohnenbefliegung im zweiwöchigen Turnus durchführt, konnte der Methodikvergleich nicht für die exakt gleichen Tage vorgenommen werden. Die Untersuchungstage liegen jedoch maximal fünf Tage auseinander (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Zeitpunkte der Drohnenaufnahmen der Professur für Landschaftsbau und der Junior-Professur für Geosensorsysteme für den Methodikvergleich der Deckungsgrad-Ermittlung

Prof. Landschaftsbau	Jun.-Prof. Geosensorsysteme
17.07.2023	12.07.2023
14.11.2023	10.11.2023
24.06.2024	25.06.2024

In einem ersten Schritt wurden die Differenzen beider Methoden berechnet (siehe Anhang 9 für die Gruppen 1 bis 3). Anschließend wurde ein gepaarter t-Test durchgeführt, um zu prüfen, ob die Differenzen zwischen den beiden Messmethoden signifikant sind. Die Ergebnisse des Tests zeigten für die **Gruppe 1** (p-Wert von 0,186) und **Gruppe 2** (p-

Wert von 0,253) keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Methoden. Die mittlere Differenz zwischen den Deckungsgraden der beiden Methoden betrug in Gruppe 1 3,7 % und bei Gruppe 2 sogar nur 0,7 %, was auf eine lediglich minimale Abweichung hinweist.

In **Gruppe 3**, welche mit anderen Arten als Gruppe 1 und 2 bepflanzt ist, sind jedoch dahingegen hochsignifikante Unterschiede zwischen den Methoden zu verzeichnen (p-Wert = $7{,}695*10^{-10}$). Die mittlere Differenz zwischen den Deckungsgraden der beiden Methoden beträgt 5,7 %, das heißt der Deckungsgrad bei der bildbasierten Vegetationsbestimmung via Photoshop ist größer als mit der punktwolkenbasierten Methodik.

Die Medianwerte der Gruppe 1 und 2 in Abbildung 78 verdeutlichen die geringen Abweichungen zwischen den Messmethoden. In Gruppe 1 streuen die Werte stärker um 0, während in Gruppe 2 und insbesondere in Gruppe 3 die bildbasiert bestimmten Deckungsgrade systematisch höher ausfallen als die Werte der punktwolkenbasierten Methode. Insbesondere in Gruppe 1 sind einzelne Ausreißer zu beobachten.

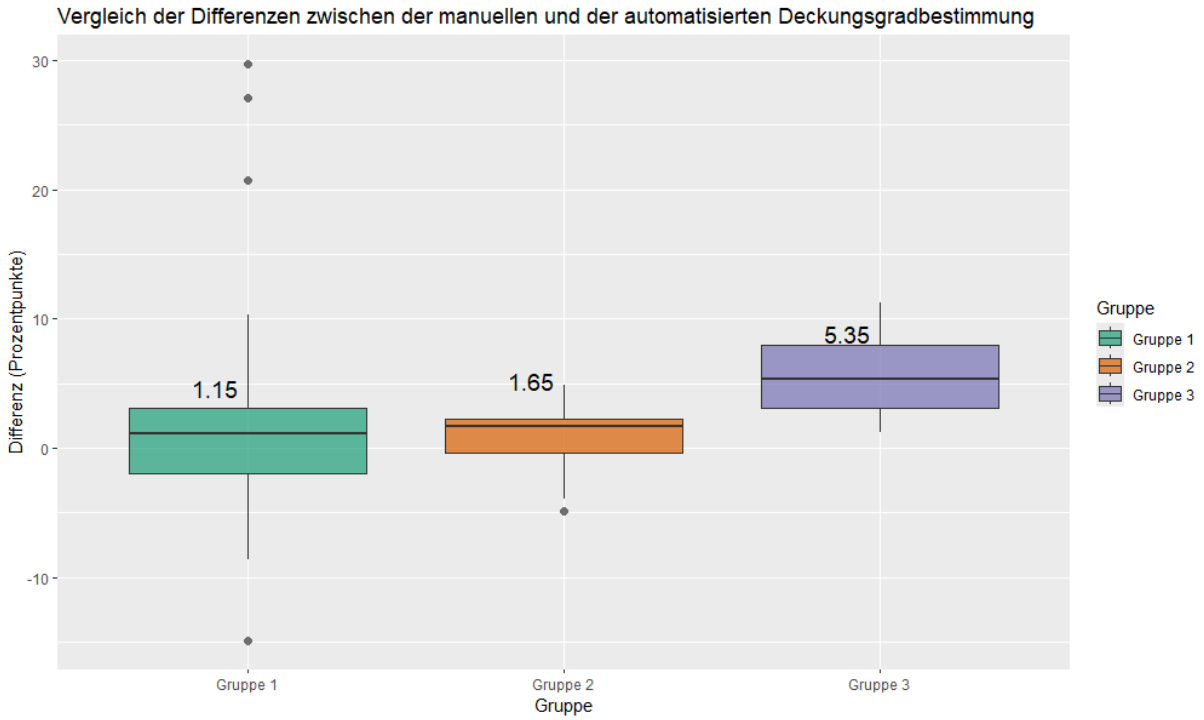


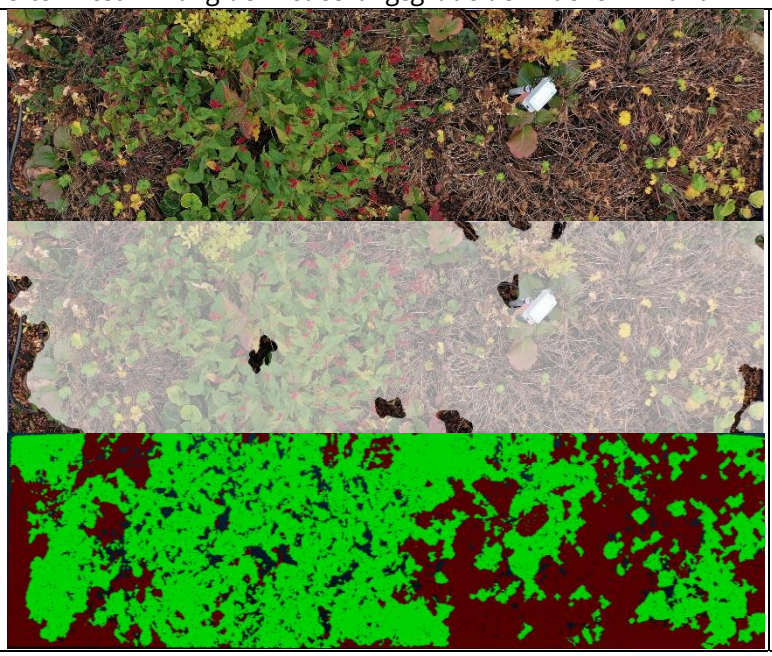
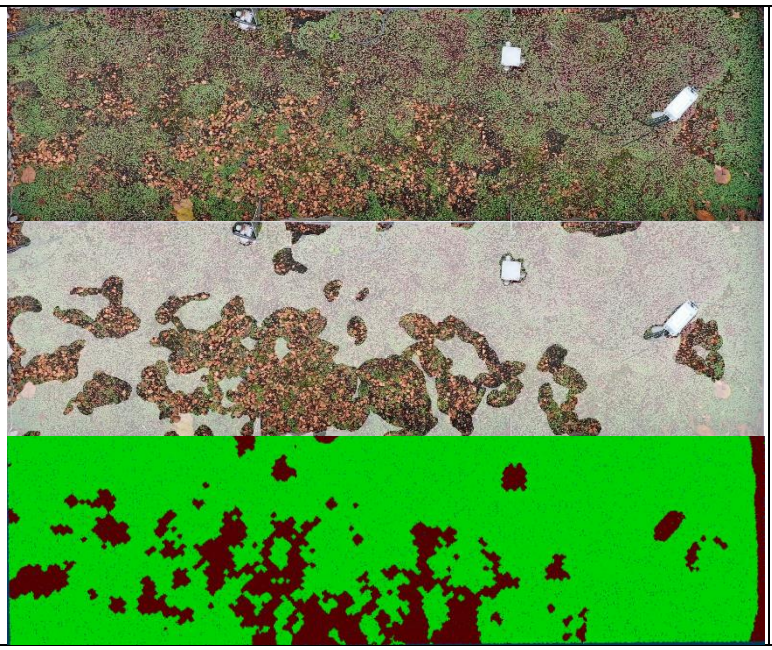
Abbildung 78: Vergleich der Differenzen zwischen der bildbasierten und der punktwolkenbasierten Deckungsgradbestimmung für die drei Gruppen auf dem Forschungsgründach. Die schwarzen Zahlen über den Boxplots geben die jeweiligen Medianwerte an.

Die vier Ausreißer der Gruppe 1 betreffen die Flächen I-1 bis I-4 am 10./14. November 2023. Der bei weitem größte Ausreißer beträgt 29,7 % bei der Fläche I-2 (Bedeckung mit bildbasierter Methode: 93,4 % und bei der punktwolkenbasierten Methode: 63,7 %). Der Grund für die erhebliche Differenz der Flächen I-1 bis I-3 ist die Einberechnung von bereits verwelktem Pflanzenmaterial bei der bildbasierten (gänzlich manuellen) Bestimmung des

Bedeckungsgrades (siehe Tabelle 18), während die punktwolkenbasierte Methodik alleinig grüne bzw. gesunde Pflanzenteile als Bedeckung gezählt hat.

Im Vergleich zur händischen Erfassung zeigt sich bei der Referenzfläche I-4 mit Sedum, dass die punktwolkenbasierte Methodik eine höhere Effizienz bei der Detektion selbst kleinster grüner Pflanzenteile aufweist (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Exemplarische Gegenüberstellung der Drohnenaufnahmen inklusive der bildbasierten und punktwolkenbasierten Bestimmung der Bedeckungsgrade der Flächen I-1 und I-4 vom November 2023

Fläche I-1		Originalbild bildbasiert: 95,0 % punktwolken-basiert: 67,9 %
Fläche I-4 (Referenz, Sedum)		Originalbild bildbasiert: 70,6 % punktwolken-basiert: 85,5 %

In den Deckungsgraden Gruppe 3 sind anhand des Boxplots größere Differenzen erkennbar, was auf größere Abweichung zwischen den Methoden schließen lässt. Der Grund hierfür ist das bereits in Kapitel 5.8 thematisierte Problem, dass die

punktwolkenbasierte Methodik bei der Rekonstruktion dünn besetzter Vegetation und Gräser eine lückige Bedeckung erzeugt.

Der Zeitaufwand für die punktwolkenbasierte Auswertung verteilt sich auf die dreidimensionale Rekonstruktion der Punktwolken aus den Bildern und der anschließenden Verarbeitung und Extraktion der Information aus diesen. Die Berechnung der Punktwolken beläuft sich hierbei auf ca. vier Stunden. Eine Stunde wird hierbei auf den Import der Bilder in das Auswerteprogramm Metashape (Version 1.8.3) und die manuelle Messung der Passpunkte verwendet. Weitere drei Stunden wurden für die Berechnung der Punktwolke verwendet. Die Auswertung der Punktwolken wurde auch manuell vorbereitet (Transformation der Punktwolken auf die Referenzepoche). Dabei kann von einer Bearbeitungszeit von 30 Minuten ausgegangen werden pro Epoche. Die Vorbereitung der Interessensbereiche (ROI) wurde in ca. einer Stunde abgeschlossen. Die automatische Beschneidung erfolgt dann in vernachlässigbarer Zeit. Einen Großteil der Zeit wurde für das Training und der Hyperparameterfindung des Klassifikators genutzt. In der Summe wurde hier eine Trainingszeit von ca. drei Stunden genutzt. Wenn nun davon ausgegangen wird, dass die optimalen Hyperparameter bereits bekannt sind, kann die Trainingszeit auf ca. 20 Minuten geschätzt werden. Die Durchführung der Analyse durch Verschneidung der ROI mit der Punktwolke, der Klassifikation und der Bestimmung der Bedeckungsgrade erfolgt zeitnah und ist im Vergleich zu den vorangegangenen Operationen vernachlässigbar. Der Zeitaufwand pro Forschungsfeld beträgt für die dreimalige Befliegung mit jeweils 21 Forschungsfeldern demnach bei einer angenommenen Gesamtarbeitszeit von 8:30 Stunden (mit Hyperparametrisierung bei initialer Auswertung) 8,1 Minuten pro Feld. Sind die optimalen Hyperparameter bereits bekannt verringert sich die Arbeitszeit (gesamt 5:50 Stunden) pro Feld auf 5,6 Minuten.

Der Zeitaufwand für die bildbasierte Methodik, das bedeutet die fotographische Auswertung der Drohnenaufnahmen von der Professur für Landschaftsbau, beträgt im Durchschnitt pro Forschungsfeld 10 Minuten. Dabei kann die Bearbeitungszeit je nach Vegetationsdichte stark variieren – in den Monaten mit hohem Bedeckungsgrad dauert die Bearbeitung i. d. R. deutlich kürzer – sind die Blätter wie bspw. im Frühjahr noch sehr fein und zart, dauert die bildbasierte und damit gänzlich manuelle Bestimmung der Vegetationsfläche länger.

Im Vergleich zur bildbasierten Auswertung bietet die punktwolkenbasierte Methodik ein deutlich günstigeres Aufwand-Nutzen-Verhältnis – vor allem bei einer wachsenden Anzahl an Bilddatensätzen. Während der initiale Zeitaufwand zur Einrichtung der punktwolkenbasierten Auswertung (inkl. Klassifikator-Training und manuelle Vorbereitungen) höher erscheint, rechnet sich dieser Aufwand bereits bei der Auswertung mehrerer Zeitpunkte. Besonders bei einem engmaschigen Befliegungsintervall, wie z. B. alle zwei Wochen, multipliziert sich der Vorteil erheblich: Die Prozessschritte der punktwolkenbasierten Methode skalieren effizient und gleichmäßig mit der Datenmenge,

da nach einmaliger Konfiguration viele Schritte reproduzierbar und mit minimalem Zusatzaufwand durchführbar sind. Darüber hinaus unterliegt die punktwolkenbasierte Methode keiner Schwankung in der Bearbeitungsdauer durch subjektive Einschätzung oder vegetationsbedingte Unterschiede in der Erkennbarkeit der Pflanzendecke. Die Reproduzierbarkeit, Konsistenz und Skalierbarkeit der punktwolkenbasierten Auswertung bieten damit nicht nur zeitliche, sondern auch qualitative Vorteile, insbesondere in Langzeitstudien mit hohem Stichprobenumfang. Zudem kann eine Optimierung der Berechnungszeit bei der punktwolkenbasierten Methodik durch die weitere Automatisierung der manuellen Bearbeitungsschritte erfolgen. Die Berechnung der Punktwolke kann beispielsweise mit direkter Georeferenzierung der Bilder erfolgen, indem die an der UAV montierten GNSS- sowie inertialen Messsensoren einbezogen werden (Schulze, Mader & Eltner, 2022). Die Transformation der Punktwolken auf eine Referenzepoche kann dadurch automatisiert werden, indem automatisch stabile Flächen zur Transformation detektiert und die Transformationsparameter über den ICP mit diesen Flächen bestimmt werden.

6. Wasserbilanz, Stoffbilanz und Abflussprozesse (Arbeitspaket 4)

6.1 Einleitung

Ziel des Arbeitspakets war die Bewertung der Langzeiteffekte der Bewässerung auf Wasser- und Stoffbilanzen. Die Untersuchungen im Rahmen des „Modellprojekt Integrales Wassermanagement mit einfacher Intensivdachbegrünung“ haben gezeigt, dass gereinigtes Grauwasser gut für die Bewässerung der Dachbegrünung geeignet ist und bisher keine negativen Auswirkungen durch Stoffakkumulation entstehen. Diese Untersuchungen wurden fortgesetzt, da die Langzeiteffekte bisher unzureichend untersucht sind (Walker et al., 2016). Dabei stehen insbesondere Salze und Tenside als potenziell pflanzenschädigende Stoffe aber auch Nitrat und Phosphor und organische Substanzen als Stoffe mit wassergefährdendem Potential im Fokus. Die Ergebnisse der Untersuchungen validieren die langfristige Verwendbarkeit von Grauwasser und geben Rückschlüsse auf den Behandlungsbedarf des Grauwassers und des Ablaufwassers aus Dachbegrünungen. In Erweiterung zu diesen Untersuchungen wurde ein Teil der Forschungsfelder mit vorfiltriertem, unbehandeltem Grauwasser bewässert. Zehnsdorf et al. (2019) demonstrierten die Anwendbarkeit von Helophytenmatten für die Behandlung von Grauwasser in Dachbegrünungen, allerdings benötigen diese Dachsysteme eine relativ kontinuierliche Zufuhr von Grauwasser. Mit dem einfachen Intensivdach wird die Behandlungsleistung eines breit anwendbaren Begrünungstyps überprüft und Empfehlungen für die Umsetzbarkeit, Dimensionierung und Betrieb abgeleitet.

Für die Simulation der Niederschlag-Abfluss-Prozesse wurde bisher die open-source Software SWMM (Rossman, 2015) genutzt. Dabei wurde deutlich, dass insbesondere die Verdunstungsprozesse aus den unterschiedlich intensiv bewässerten Forschungsfeldern nicht mit ausreichender Genauigkeit abgebildet werden können. Seit 2021 ist eine Erweiterung der Software zur detaillierten Beschreibung von urbanen Verdunstungsprozessen (Hörnschemeyer et al., 2021) verfügbar. Dieses soll auf sein Anwendungspotential getestet und Parametrisierungen für Dachbegrünungen vorgeschlagen werden, sodass sie Fachanwender:innen zur Verfügung stehen.

6.2 Wasserhaushalt

6.2.1 Hydroklimatische Randbedingungen und Bewässerung

Die Monate Juni bis September der bisherigen Untersuchungsjahre waren durchweg deutlich wärmer als die Klimanormalperioden 1961 – 1990 und 1991 – 2020. Im Vergleich zur früheren Periode lag die Abweichung bei 2,2 bis 3,2 °C, für die Spätere bei 0,9 bis 1,9 °C. Entsprechend nahm auch die Zahl der Sommertage, mit einer Maximaltemperatur von über 25°C, deutlich zu. Das wärmste Jahr war dabei 2023. Für den Niederschlag fällt die Veränderung weniger eindeutig aus. 2022 und 2023 waren trockener als die Mittelwerte der Normalperioden, 2021 und 2024 dagegen feuchter. Dennoch weist 2024 die größte Anzahl an Trockentagen, mit weniger als 0,1 mm/d Niederschlag, auf, da zwei

extreme Starkregenereignisse im August mit 91 mm/d und September mit 84 mm in vier Tagen, mehr als die Hälfte des Gesamtniederschlags ausmachten. Die Bewässerung wurde in allen Jahren Ende Mai bis Anfang Juni in Betrieb genommen. Damit lag die Dauer der Bewässerungsperiode zwischen 147 und 189 Tagen. Entsprechend der drei Bewässerungsregime, erhielten die maximal bewässerten Felder 353 – 455 mm, die medialen Felder 176 – 227 mm und die minimal bewässerten Felder 88 – 113 mm zusätzliches Wasser.

Tabelle 19: Meteorologische Kenngrößen der Monate Juni bis September und Bewässerungszeiträume in den Jahren 2021 – 2024 und im Vergleich zu den Klimanormalperioden 1961 – 1990 (KNP 61 – 90) und 1991 – 2020 (KNP 91 – 20) an der Klimastation Dresden-Strehlen

Jahr	Bewässerungs-zeitraum	Nieder-schlag [mm]	Anzahl Trocken-tage	Anzahl Sommer-tage	mittlere Temperatur [°C]
KNP 61 - 90		275	63	38	16.5
KNP 91 - 20		283	69	44	17.8
2021	11.06. – 24.11.	321	65	56	18.7
2022	20.05./17.06. – 25.11.	229	71	62	19.2
2023	05./21.06. – 09.11.	245	68	68	19.7
2024	21.05./07.06. – 21.11	346	76	57	19.2

6.2.2 Niederschlag-Abfluss-Prozesse

Die Retentionswirkung von Dachbegrünungen ist etablierter Stand der Technik und findet in Normen und Regelwerken Berücksichtigung (DWA, 2022; DIN, 2016). Die Auswirkung der Bewässerung auf diese Rückhaltewirkung ist bisher aber kaum dokumentiert. Abbildung 79 zeigt exemplarisch die Abflussreaktion in Folge eines Regenereignisses am 23.08.2023. Während die frühen Intensitätsspitzen bei allen Bewässerungsintensitäten weitgehend zurückgehalten werden, erzeugt die Hauptspitze für das maximal bewässerte Messfeld eine deutlich erhöhte Abflussspitze. Im späteren Verlauf wird auch die Bewässerungsgabe weitgehend abflusswirksam und führt zu einer Abflussspitze, die nicht im Zusammenhang mit der Regendynamik steht.

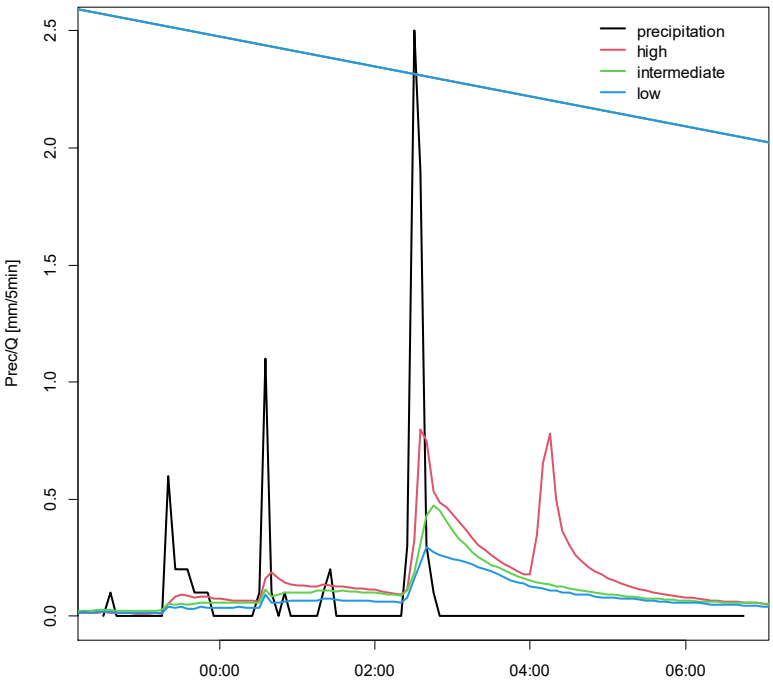


Abbildung 79: Niederschlag- und Ablaufintensitäten der Messfelder I.1 (maximal bewässert = high), I.2 (medial bewässert = intermediate) und I.3 (minimal bewässert = low) für das Regenereignis am 23.08.2023.

Um die Rückhaltewirkung systematisch zu bewerten und die Bedeutung der Ereignisdauer zu berücksichtigen, wurden für die Dauerstufen 15 Minuten, eine Stunde und vier Stunden jeweils 15 Ereignisse aus dem Zeitraum der Jahre 2021 – 2023 ausgewählt, welche folgende Kriterien aufwiesen: Mindestdauer entsprechend der Dauerstufe, die höchste mittleren Intensität der Dauerstufe, mindestens 5 mm Gesamtniederschlagshöhe, mindestens 1 mm/5 min Spitzenintensität. In Tabelle 20 sind die Spannweiten der Ereigniseigenschaften zusammengefasst.

Tabelle 20: Spannweiten der Ereigniseigenschaften der 15 intensivsten Niederschlags-ereignisse für die Dauerstufen 15 Minuten, 1 Stunde und 4 Stunden im Zeitraum 2021 - 2023

Dauerstufe D	15 min	1 h	4 h
Regenhöhe [mm]	5.6 – 41.2	7.9 – 41.4	5.1 – 54.1
Ereignisintensität [mm/D]	3.8 – 20.7	6.2 – 14.4	3.4 – 29.6
max. Intensität [mm/5 min]	1.7 – 10.1	1.1 – 4.3	1.1 – 3.2
Dauer [min]	20 – 510	80 – 960	485 – 1590

Diese Ereignisse wurden nach den hydraulischen Kenngrößen Abflussbeiwert c_M (Verhältnis aus Abflussvolumen zu Niederschlagsvolumen) und Spitzenabflussbeiwert c_S (Verhältnis aus maximaler Niederschlagsintensität zu maximaler Abflussintensität) ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 80 dargestellt. Die ermittelten Beiwerte liegen im Bereich der Werte nach DIN (2016), die für Dachbegrünungen mit mehr als zehn Zentimetern Substratdicke, auf Dächern mit weniger als 5 % Neigung einen c_S von 0,4 und einen c_M von 0,2 ansetzt. Für den 15-minütigen Regen liegen die ermittelten c_S bei 0 – 0,43,

für den einstündigen Regen bei 0 – 0,47 und für den vierstündigen Regen bei 0,02 – 0,61. Dabei weisen die maximal bewässerten Felder jeweils die höchsten Werte auf und mit zunehmender Ereignisdauer nehmen die c_S zu. Nur wenige Werte liegen dabei über dem DIN-Wert, dieser wird mit einem Referenzregen von 9 mm/5 min ermittelt. Auch für den c_M Wert streuen die Werte stark und mit ähnlichen Tendenzen wie beim c_S, die maximal bewässerten Felder weisen die höchsten Werte auf und mit zunehmender Ereignisdauer steigt auch der c_M. Im Vergleich zur DIN liegen die Werte deutlich höher, da dort die jährliche Wasserbilanz berücksichtigt wird, während hier nur Abfluss-intensive Starkregenereignisse eingingen.

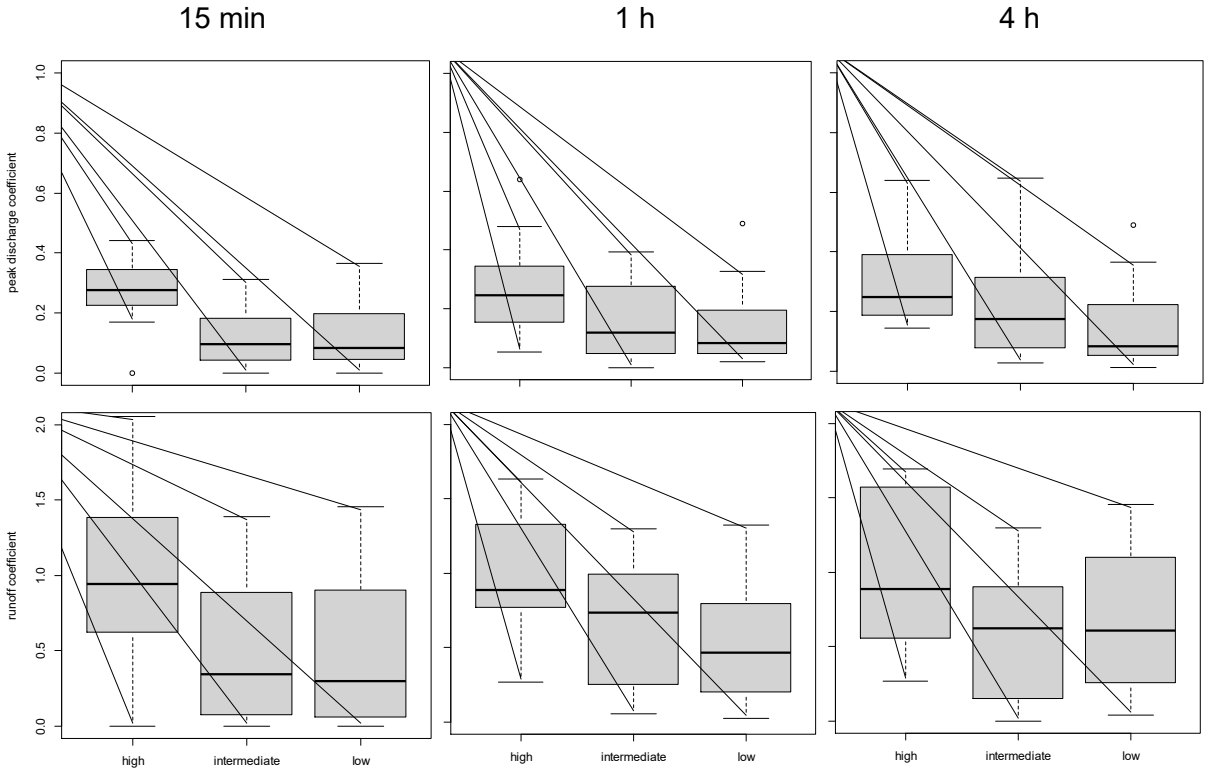


Abbildung 80: Spannweiten, Interquartilsabstand und Mittelwerte der Spitzenabflussbeiwerte (oben, peak discharge coefficient) und Abflussbeiwerte (unten, runoff coefficient) für die Messfelder I.1 (maximal bewässert = high), I.2 (medial bewässert = intermediate) und I.3 (minimal bewässert = low) bei Regenereignissen mit 15 min, 1 h und 4 h Dauer.

6.2.3 Wasserbilanz

Um die Auswirkungen der verschiedenen Dachaufbauten, aber auch die Auswirkung der Bewässerungsintensitäten auf die einfache Intensivbegrünung zu vergleichen, wurden die erweiterte Wasserbilanz für die Bewässerungsperiode 2023 aufgestellt. Dabei wurden das Kiesfeld (Feld II.1), das Feld mit extensiver Dachbegrünung (Feld I.4), ein unbewässertes Feld (Feld III.8) sowie die minimal (I.3), medial (I.2) und maximal (I.1) bewässerten Felder mit einfacher Intensivbegrünung verglichen. Es sind Niederschlag, Bewässerungsmenge und Abfluss direkt gemessen, die Speicheränderung aus der Differenz der Bodenfeuchten zu Beginn und Ende der Bewässerungsperiode ermittelt und die Verdunstung als Restglied einer geschlossenen Bilanz betrachtet worden. Die Ergebnisse sind in Abbildung

81 dargestellt. Die ermittelten Werte liegen für die unbewässerten Dachaufbauten etwa im Bereich der DIN-Werte für den c_M. Das Kiesdach weist mit 162 mm einen Abflussanteil von 0,66, im Vergleich zum DIN-Wert von 0,80, auf. Bei der Extensivbegrünung beträgt der ermittelte c_M 0,55 und der DIN-Wert 0,40, die einfache Intensivbegrünung liegt bei ermittelten 0,32 und bei 0,20 laut DIN. Diese Abweichungen heben die Bedeutung lokaler und Aufbau-spezifischer Bemessungswerte hervor. Einschränkend ist anzumerken, dass sich die DIN-Werte auf Jahreswerte beziehen, während die ermittelten Werte für die Bewässerungsperiode erhoben wurden.

Für die drei bewässerten Flächen gibt es keine normhaften Vergleichswerte. Hier liegen die mittleren Abflussbeiwerte, bezogen auf die Niederschlagsmenge, bei 0,38 für die minimal bewässerte Dachbegrünung, bei 0,42 für die mediale Bewässerung und bei 0,61 für die maximale Bewässerung. Damit liegen die Beiwerte zwar deutlich höher als für die unbewässerte Dachbegrünung, gleichzeitig wird aber nur ein kleiner Teil des Bewässerungswassers abflusswirksam. Für das minimal bewässerte Feld nimmt der Abfluss um 11 mm zu, die Verdunstung steigt aber um 45 mm, für das mediale Feld liegen die Zunahmen bei 26 mm Abfluss und 106 mm Verdunstung und für das maximale Feld bei 72 mm Abfluss und 251 mm Verdunstung. Wenn man die Bewässerungsmengen als vermiedenes Schmutzwasseraufkommen auffasst, tragen die bewässerten Dachbegrünungen zu einer Entlastung des Entwässerungssystems bei.

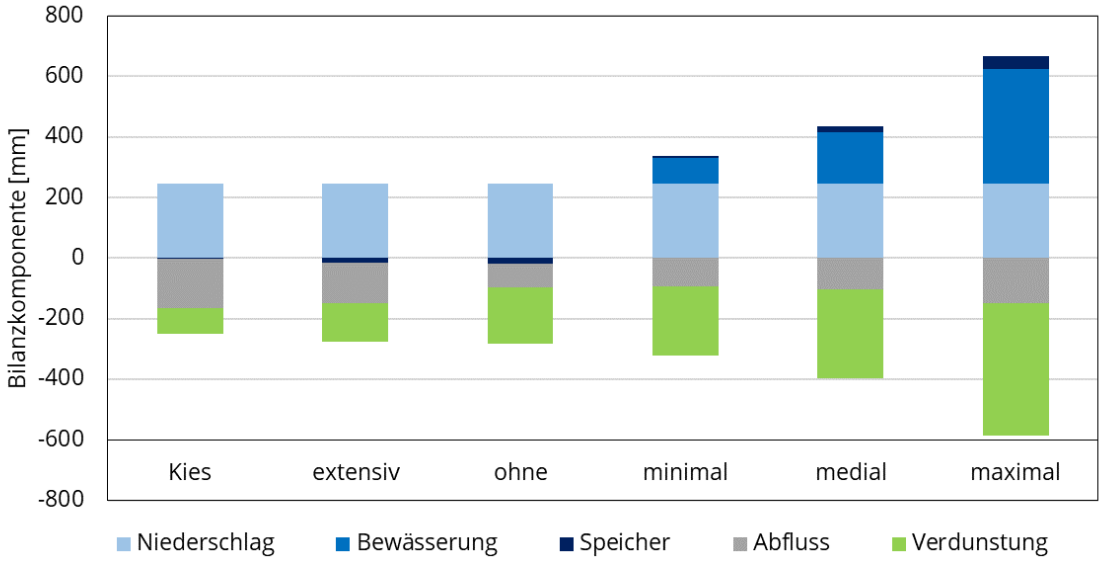


Abbildung 81: Wasserbilanzkomponenten für die Bewässerungsperiode 2023 für Kiesdach, extensive, unbewässerte (ohne), minimal, medial und maximal bewässerte einfache Intensivdachbegrünung

6.3 Stoffhaushalt

Die Wasserqualitäten für das ungeklärte wie auch für das geklärte Grauwasser wurden bereits im Vorgängerprojekt (vgl. Lohaus et al., 2023) thematisiert. Darauf aufbauend wurde in diesem Projekt untersucht, inwieweit der langfristige Stoffhaushalt durch die Bewässerung beeinflusst wird und ob auch das ungeklärte (lediglich mechanisch filtrierte) Grauwasser eine ausreichende Wsserqualität für die Bewässerung bereitstellt.

Die stofflichen Prozesse werden anhand ausgewählter Wasserqualitätsparameter charakterisiert. Zur Beschreibung des Kohlenstoffhaushaltes werden die Parameter des gesamten chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) und das gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) erfasst. Mit den Stoffkonzentrationen von Ammonium-Stickstoff (NH4-N), Nitrat-Stickstoff (NO3-N) und Gesamtstickstoff (TN) können der Stickstoffrückhalt und die -umwandlung abgebildet werden. Zusätzlich werden Leitfähigkeit (LF) und der pH-Wert erfasst, um den chemischen Salzhaushalt des Substratkörpers beschreiben zu können.

Die Beprobungen fanden in den Jahren 2023 und 2024 in etwa 14-tägig während des Bewässerungszeitraums, sowie zur Referenz jeweils einmal 14 Tage vor und nach der Bewässerung statt.

6.3.1 Bewässerungswasser

Als neuer Untersuchungsschwerpunkt wurde die Auswirkung der Bewässerung mit mechanisch filtriertem Grauwasser untersucht. Dafür wurde ein netafim ARKAL Siebscheibenfilter mit einer Siebgröße von 130 µm verwendet. Abbildung 82 vergleicht die Grauwasserqualitäten von dem ungeklärten (mechanisch filtriertem) und in der Pflanzenkläranlage (PKA) gereinigtem Abwasser. Es wird deutlich, dass die Filtration auf die gelösten Wasserinhaltsstoffe (DOC, TN, NO3-N) keinen maßgeblichen Einfluss hat. Auch bei den teilgelösten Stoffen fällt die Reduktion eher gering aus, der mittlere CSB weist im Rohgrauwasser 163 mg/l auf, im filtrierten Grauwasser sind es 149 mg/l, der mittlere TP im Rohgrauwasser ist 2,7 mg/l während im filtrierten Grauwasser 2,1 mg/l enthalten sind. Die stärkste Reduktion durch die Filtration tritt erwartungsgemäß beim TSS auf, hier liegen die mittleren Werte im Rohgrauwasser bei 86 mg/l, das filtrierte Grauwasser liegt mit 46 mg/l und damit um 47 % niedriger. Im Gegensatz dazu erzielt die Pflanzenkläranlage eine erhebliche Reduktion der untersuchten Substanzen. Das geklärte Grauwasser enthält dagegen im Mittel 28 mg/l (-84 %) CSB, 10,8 mg/l (-67 %) DOC, 7,3 mg/l (-75 %) TN, 5,2 mg/l (-93%) TSS und 0,4 mg/l (-64 %) TP, die Prozentangaben in Klammern beziehen sich dabei auf die Reduktion im Vergleich zum Rohgrauwasser. Die Zunahme beim NO3-N ist auf die Umwandlung von Ammonium und organischem Stickstoff in Nitrat zurückzuführen. Insgesamt belegen die Untersuchungsergebnisse, dass das Grauwasser vor Ort geringere Konzentrationen als übliche Literaturwerte aufweist. Die Reinigungsleistungen der Pflanzenkläranlage fielen teilweise noch höher als im Vorgängerprojekt aus, während sich die Reduktion durch die Filtration im Wesentlichen auf den Rückhalt von suspendierten Stoffen beschränkte.

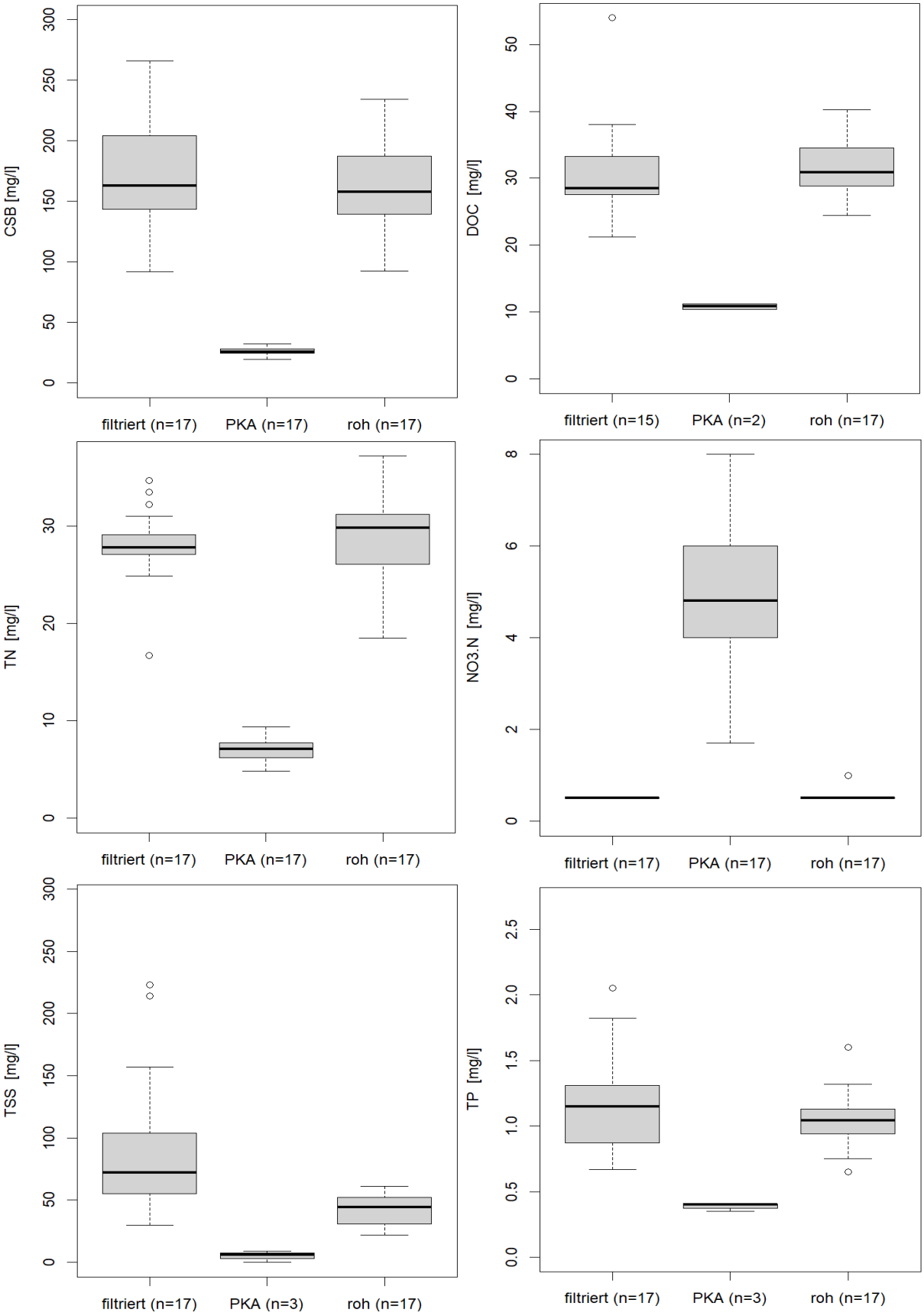


Abbildung 82: Stoffkonzentrationen für chemischen Sauerstoffbedarf (CSB), gelösten organischen Kohlenstoff (DOC), Gesamtstickstoff (TN), Nitrat-Stickstoff (NO3.N), suspendierte Stoffe (TSS) und Gesamtphosphor (TP) im ungereinigten Abwasser (roh), filtrierten Grauwasser und gereinigten Grauwasser (PKA).

6.3.2 Salzhaushalt in der Dachbegrünung

Die Akkumulation von Salzen wird häufig als Risikofaktor bei der Bewässerung mit Grauwasser thematisiert, da hohe Salzgehalte physiologischen Stress für die Pflanzen bedeuten können. Um diesen Umstand zu bewerten und die langfristige Dynamik der Salzkonzentrationen zu erfassen, wurden die Messungen der elektrischen Leitfähigkeit (electric conductivity, EC) in den Ablaufbehältern ausgewertet. Die EC ist dabei ein gut etablierter Surrogatparameter für den Ionen- bzw. Salzgehalt. Abbildung 83 stellt die Ergebnisse für elf Messfelder im Verlauf der Jahre 2021 – 2024 dar. Die EC schwankt zum Großteil in einem Korridor von 200 – 2000 µS/cm. Generell nehmen die Werte und die Variabilität zwischen den Messfeldern im Verlauf der Untersuchungsperiode ab. Dabei ist auffällig, dass das extensive Feld (I.4) und die Felder der Gruppe I (I.1 – I.3) im Zeitraum Januar 2021 – Mai 2022 vergleichsweise hohe Werte aufweisen, sich aber im Verlauf des Sommers 2022 an die anderen bewässerten Felder angleichen. Eine Ursache könnte in unterschiedlichen Anfangskonzentrationen gelöster Stoffe im Begrünungssubstrat liegen. Diese Vermutung wird durch den Umstand gestützt, das benachbarte Messfelder, die konsekutiv mit Substrat befüllt wurden eine ähnliche Anfangsdynamik aufweisen. Die EC der unbewässerten Felder liegen meist unter denen der bewässerten Felder, damit muss von einem erhöhten Salzexport aus der Dachbegrünung in Folge der Bewässerung ausgegangen werden. Die Unterschiede zwischen den Replikaten und Bewässerungsintensitäten sind aber gering und unsystematisch. Die rückläufigen EC während der Untersuchungsperiode sprechen gegen eine Akkumulation von Salzen im Begrünungssubstrat.

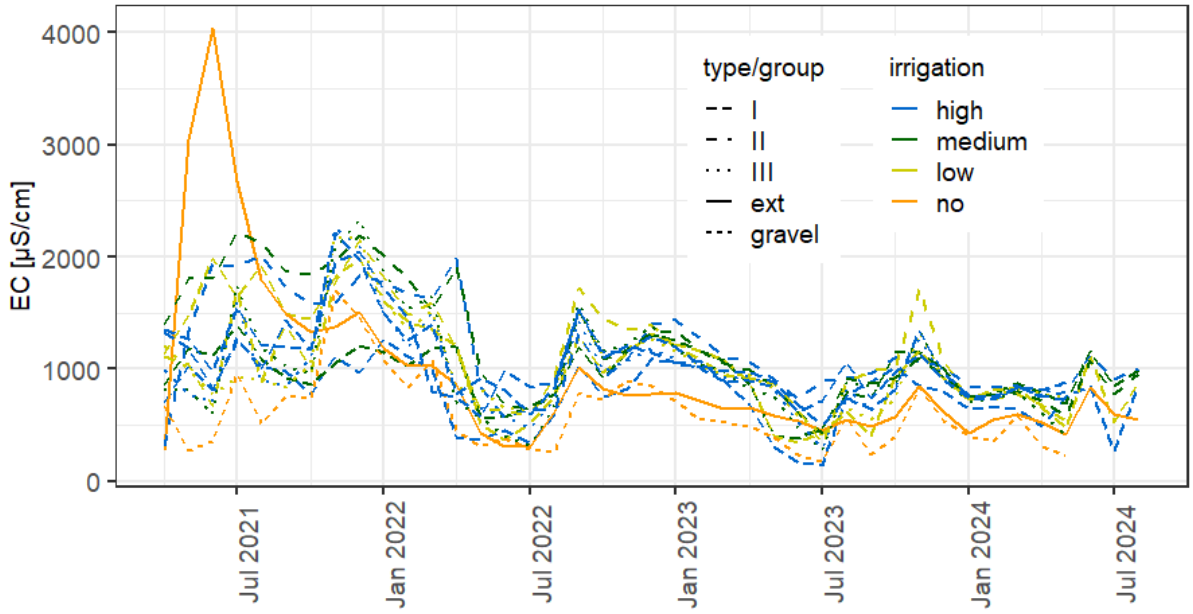


Abbildung 83: Verlauf der mittleren monatlichen Werte für elektrische Leitfähigkeit (electric conductivity, EC) im unbewässerten Kiesdach (gravel) und Extensivdach (ext) sowie in jeweils drei Replikaten (I-III) der minimal (low), medial (medium) und maximal (high) bewässerten einfachen Intensivbegrünungen.

6.3.3 Stoffrückhalt in der Dachbegrünung

Eine weitere zentrale Forschungsfrage des Arbeitspaketes adressierte die Nutzbarkeit von filtriertem Grauwasser für die Bewässerung von Dachbegrünungen. Hierfür wurden die Ablaufqualitäten von jeweils zwei maximal bewässerten Dachfeldern mit filtriertem und gereinigtem Grauwasser im Verlauf der Jahre 2023 und 2024 untersucht. Dabei trat zu Beginn des Jahres 2023 die Intervention auf, dass in Folge des Käferbefalls auf den Feldern der Gruppe III, eine Neubepflanzung erfolgte. Der Vergleich der Messungen für den CSB ist in Abbildung 84 dargestellt.

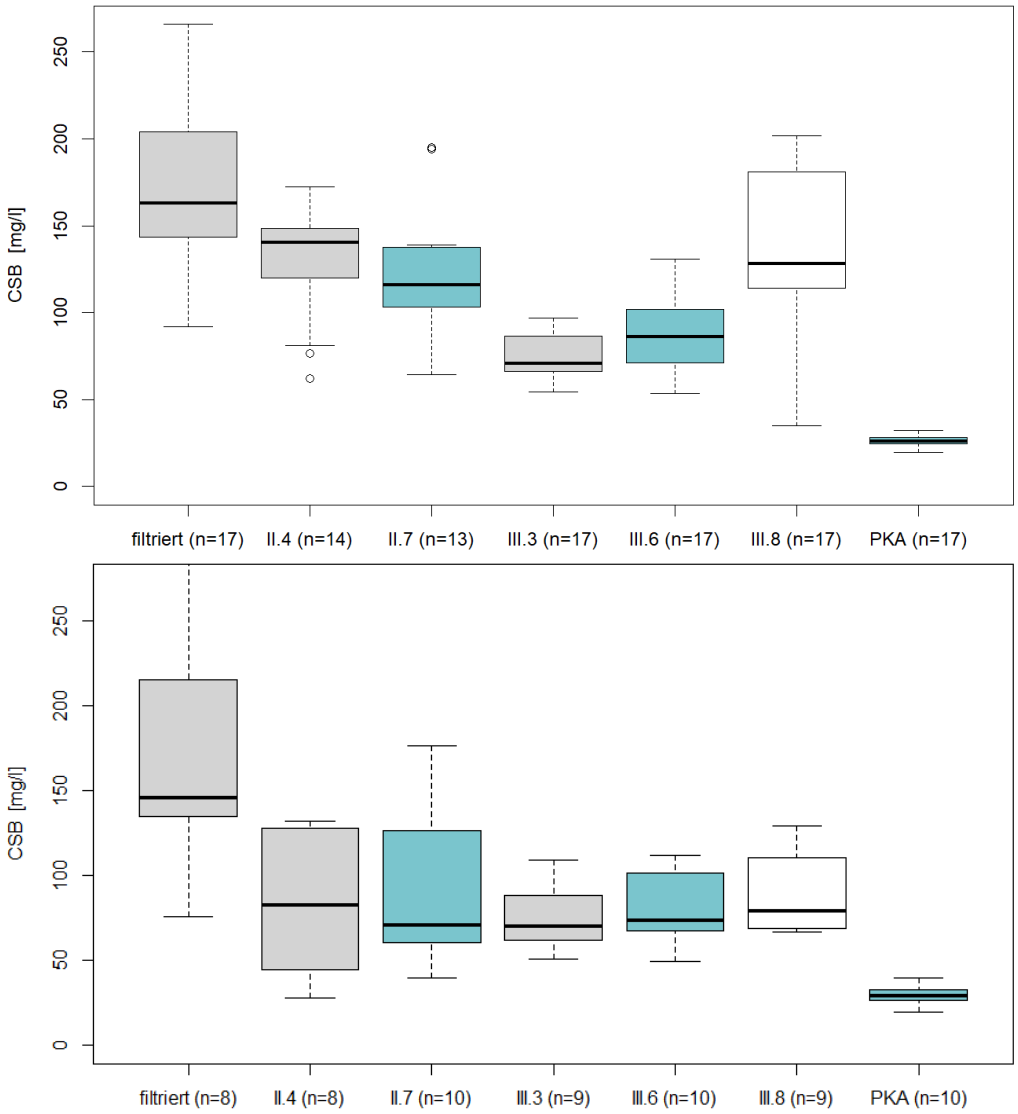


Abbildung 84: Stoffkonzentrationen für chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) der Jahre 2023 (oben) und 2024 (unten) im filtrierten Grauwasser (filtriert), gereinigtem Grauwasser (PKA), sowie im Ablauf der mit filtriertem Grauwasser bewässerten Felder II.4 und III.3, mit gereinigtem Grauwasser bewässerten Felder II.7 und III.6 und dem Ablauf des unbewässerten Felds III.8

Für das Jahr 2023 liegt die CSB-Konzentration aller Messfelder in einem Wertebereich von 42 – 202 mg/l. Die Konzentration der beiden bewässerten Felder in den Gruppen II (etablierte Bepflanzung) und III (Neubepflanzung) liegt dabei jeweils in einem ähnlichen Bereich, unterscheidet sich aber signifikant zwischen den Gruppen. Die Felder der

Gruppe II weisen deutlich höhere CSB-Konzentrationen auf. Das größere Biomassevolumen der Pflanzen und des Wurzelraums könnte zur vermehrten Produktion und Freisetzung von organischen Stoffen und Abbauprodukten führen. Das unbewässerte Feld III.8 weist ebenfalls deutlich höhere Konzentrationen und auch eine höhere Varianz der Messwerte auf, als die bewässerten Felder der Gruppe III. Möglicherweise führt die geringere Ablaufmenge des unbewässerten Felds zu einer stärkeren Dynamik von Akkumulation und Auswaschung.

Im Jahr 2024 sind die Unterschiede der CSB-Konzentration im Ablauf aller fünf Messfelder dagegen nur gering ausgeprägt und generell niedriger als 2023. Einerseits war die Neubepflanzung des Vorjahres bereits weiter etabliert, so dass sich daraus folgende Unterschiede weniger ausprägten. Andererseits könnte das höhere Niederschlagsaufkommen 2024 zu einer stärkeren Verdünnung der organischen Rückstände im Ablauf und damit zu niedrigeren CSB-Konzentrationen beitragen.

Die CSB-Konzentrationen des Bewässerungswassers waren in beiden Jahren ähnlich. Das filtrierte Grauwasser weist Konzentrationen von 75 – 285 mg/l auf, das gereinigte Grauwasser liegt 19 – 32 mg/l deutlich darunter. Für das filtrierte Grauwasser reduziert die Dachbegrünung die CSB-Konzentration, während bei Bewässerung mit gereinigtem Grauwasser eine Aufkonzentration stattfindet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich diese Aussagen auf die Stoffkonzentration beziehen. Unter Berücksichtigung des signifikanten Wasserrückhalts durch Verdunstung (vgl. Abschnitt 6.2.3) trägt die Dachbegrünung für beide Bewässerungswasserqualitäten zu einer weitergehenden Reinigung bei. Für das filtrierte Grauwasser erreicht sie dabei einen ähnlichen CSB-Rückhalt wie die Pflanzenkläranlage, da sich die Ablaufqualitäten bei beiden Bewässerungswässern nicht signifikant unterscheiden.

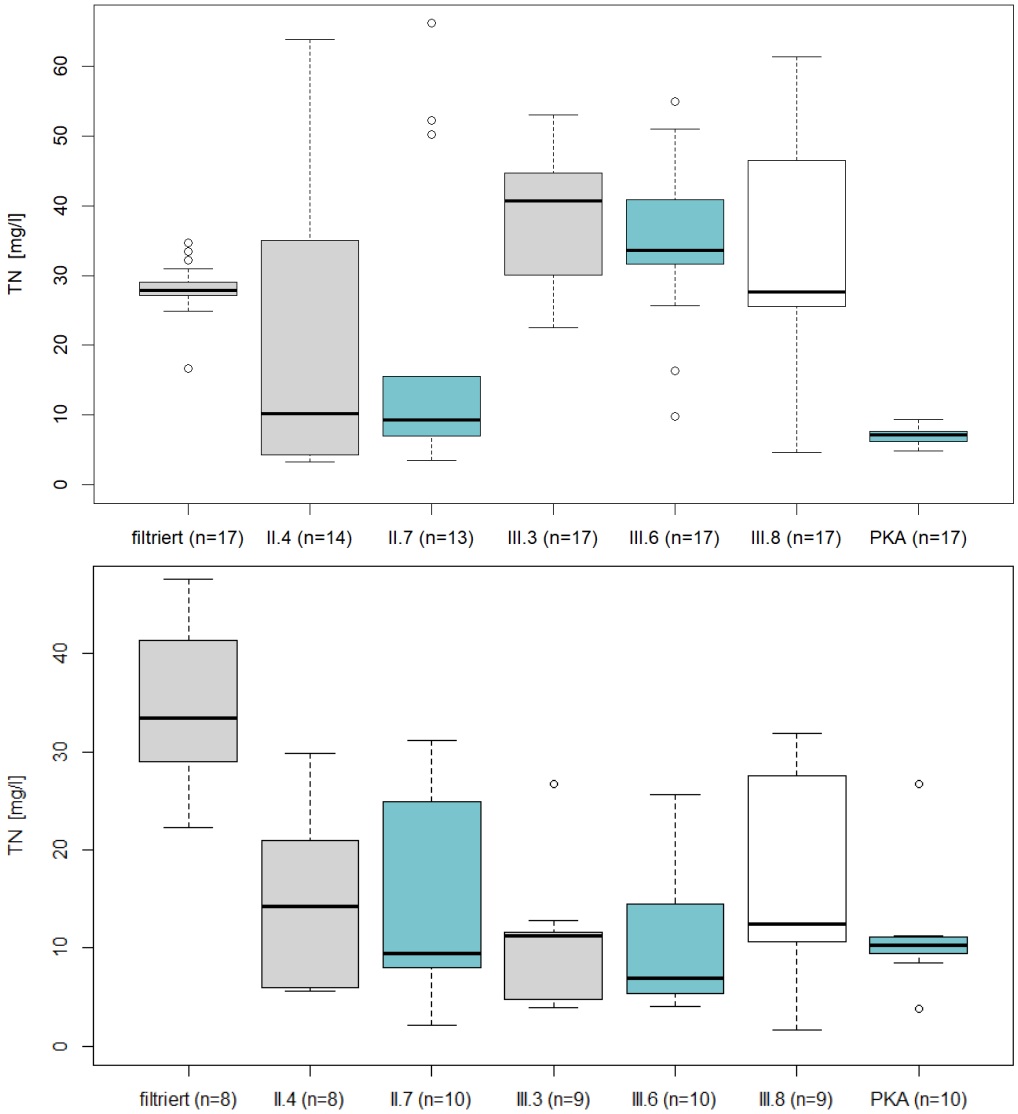


Abbildung 85: Stoffkonzentrationen für Gesamtstickstoff (TN) der Jahre 2023 (oben) und 2024 (unten) im filtrierten Grauwasser (filtriert), gereinigtem Grauwasser (PKA), sowie im Ablauf der mit filtriertem Grauwasser bewässerten Felder II.4 und III.3, mit gereinigtem Grauwasser bewässerten Felder II.7 und III.6 und dem Ablauf des unbewässerten Felds III.8

Neben organischen Stoffen sind auch Nährstoffe eine zentrale Zielgröße bei der Abwasserreinigung. Der Rückhalt von Stickstoff ist dabei wichtig für den Schutz von Gewässern und Grundwasserressourcen. Abbildung 85 visualisiert die Untersuchungsergebnisse für Gesamtstickstoff (TN) im Vergleich der Jahre 2023 und 2024. Für das Jahr 2023 tritt eine umgekehrte Dichotomie wie beim CSB auf. Die Felder der Gruppe II weisen deutlich geringere TN-Konzentrationen auf, als die Felder der Gruppe III. Das unbewässerte Feld III.8 weist ebenfalls deutlich höhere Konzentrationen und auch eine höhe Varianz der Messwerte auf. Möglicherweise stellen die Nährstoffe in den Pflanzballen der neu gepflanzten Stauden eine zusätzliche Stickstoffquelle bereit, die im Laufe des Jahres ausgewaschen wird und zu den erhöhten Konzentrationen beiträgt.

Im Jahr 2024 sind die Unterschiede der TN-Konzentration im Ablauf aller fünf Messfelder dagegen geringer ausgeprägt und für die Felder der Gruppe III deutlich niedriger als 2023.

Dieser Umstand stützt die Vermutung, dass der erhöhte Stickstoffgehalt 2023 im Zusammenhang mit der Neubepflanzung stand. In beiden Jahren weisen die mit filtriertem Grauwasser bewässerten Felder leicht höhere TN-Konzentrationen auf, als die Felder, die gereinigtes Grauwasser erhielten.

Wie die CSB-Konzentrationen, waren auch die TN-Konzentrationen des Bewässerungswassers in beiden Jahren ähnlich. Das filtrierte Grauwasser weist Konzentrationen von 22 – 48 mg/l auf, das gereinigte Grauwasser liegt mit 4,8 – 11 mg/l deutlich darunter. 2023 liegen die Felder der Gruppe II bei ähnlichen Konzentrationen wie das gereinigte Grauwasser, 2024 trifft dies für alle Messfelder zu. Für das filtrierte Grauwasser reduziert die Dachbegrünung folglich die TN-Konzentration deutlich, bei Bewässerung mit gereinigtem Grauwasser verändert sich die Konzentration nicht signifikant. Auch hier trägt die Dachbegrünung in Folge des Wasserrückhalts durch Verdunstung (vgl. Abschnitt 6.2.3) für beide Bewässerungswasserqualitäten zu einer weitergehenden Reinigung bei und substituiert die Reinigungsleistung der Pflanzenkläranlage für das gefilterte Grauwasser.

7. Bauklimatische Untersuchung des Kühlpotenzials (Arbeitspaket 5)

7.1 Einleitung

Es soll mittels hygrothermischer Simulation untersucht werden, wie groß das Kühlpotential eines bewässerten Gründachs ist. Der Konstruktionsaufbau basiert auf dem Gründachaufbau, der im botanischen Garten des Großen Gartens Dresden installiert und mit wissenschaftlichen Methoden untersucht wurde. In einer Voruntersuchung werden zunächst das Modell des Gründachs aufgesetzt, die Klimadaten zugeordnet und die Ausgaben definiert. Die initialen Parameter umfassen den Konstruktionsaufbau bestehend aus der Tragkonstruktion, Wärmedämmung und Substratschicht. Die Betrachtung verschiedener Bewässerungszyklen und Innenklimabedingungen ermöglicht die Definition des Kühlpotentials, welches das bewässerte Gründach dem darunterliegenden Innenraum zur Verfügung stellt. Nach Abgleich der initialen Voraussetzungen und Parameter wird eine Variantenuntersuchung durchgeführt, um die Einflüsse des Bewässerungsregimes, der Dämmstoffdicke, der Wasserspeicherfähigkeit des Substrats, des Innenklimas und der Substratschichtdicke näher zu untersuchen. Zum Abschluss wird das Modell einer Verifikation unterzogen, um festzustellen, ob aufgrund der gewählten Modellparameter das Kühlpotential systematisch unterschätzt wurde. Die entsprechenden Parameter für Verdunstung und kapillaren Transport von Wasser durch Wurzeln werden weit über den üblichen Bereich hinaus maximiert, um die physikalischen Grenzen auszutesten.

7.2 Voruntersuchungen

Der abgebildete Konstruktionsaufbau (Abb. 86) ist den Vorarbeiten des Gründachprojektes entnommen und besteht vereinfacht aus einer Betondecke, einer Wärmedämmung, einer Luftschicht für die Drainage und einer Substratschicht. Auf die Modellierung weiterer thermisch nicht relevanter Details (wie Sperrschichten ect.) wird verzichtet.

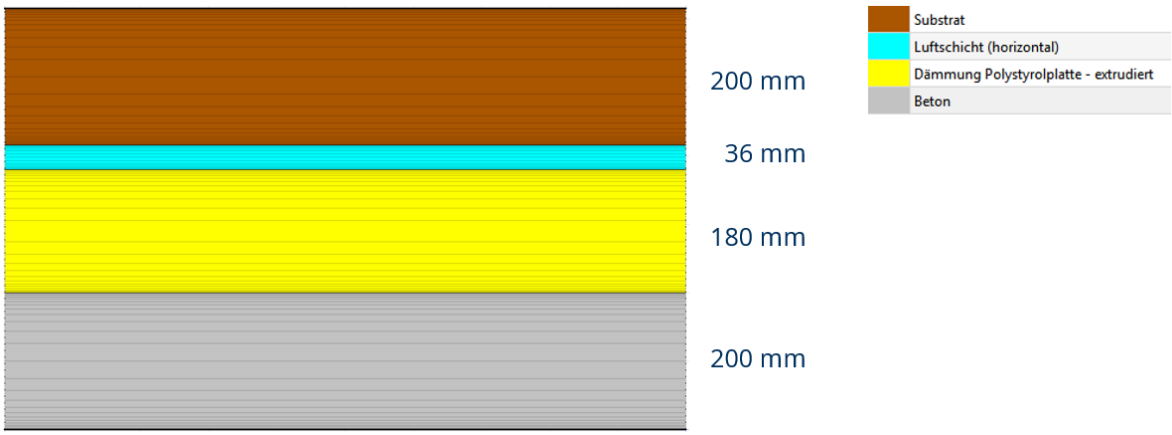


Abbildung 86: Konstruktion

Die Klimadaten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes im Großen Garten in hoher zeitlicher Auflösung gemessen. Diese umfassen die Lufttemperatur, die kurzwellige Solarstrahlung, die relative Luftfeuchte, die langwellige Himmelsgegenstrahlung und den Niederschlag in Form von Regen. Die Daten sind insgesamt plausibel und größtenteils vollständig. Wenige Ausfälle der Messtechnik können durch lineare Interpolation kompensiert werden. Das Standortklima wird als Randbedingung an der Außenoberfläche der Gründachkonstruktion angesetzt (Abb. 87).

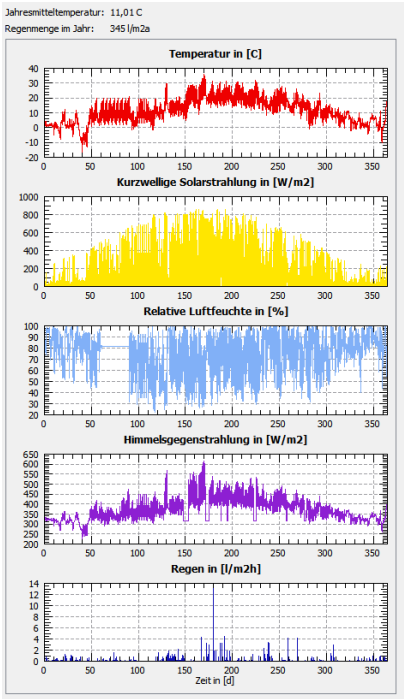


Abbildung 87: Klimadaten am Standort

Für die Modellierung des Innenklimas eines gedachten Raumes (Abb. 88), welches an der Unterseite der Dachkonstruktion als Randbedingung angesetzt wird, existieren verschiedene Optionen.

Falls der Innenraum nicht klimatisiert wird, aber im Winter beheizt, ist davon auszugehen, dass im Winter die thermische Behaglichkeit gewährleistet ist und im Sommer dagegen etwas höhere Temperaturen herrschen werden. Die relative Luftfeuchte ist davon ebenfalls betroffen. Für die Berechnung des Innenklimas wird dann der WTA-Standard (adaptives Innenklima nach DIN EN 15026) angewendet. Die Verläufe der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte sind obiger Abbildung zu entnehmen.

Als zweite Option wird ein vollständig klimatisierter Innenraum betrachtet. Das Innenklima wird dann vereinfacht mit konstant 18°C Temperatur und 50 % relativer Feuchte angenommen.

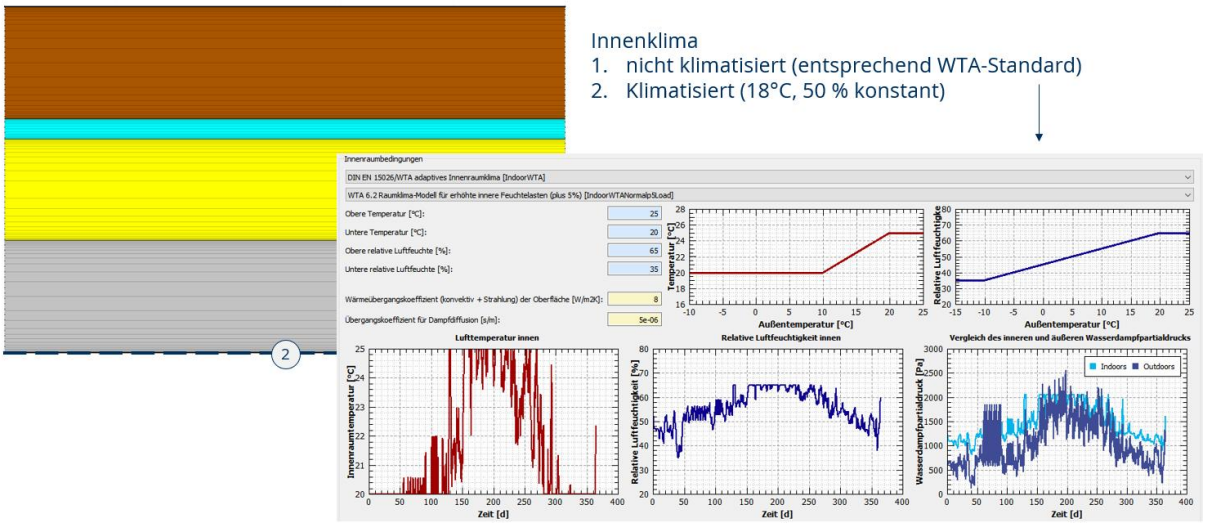


Abbildung 88: Innenklima

In der Voruntersuchung wird zunächst ein hypothetisches Bewässerungsregime angesetzt, da zu diesem Zeitpunkt noch keine detaillierteren Informationen darüber vorlagen. In der Mitte der Substratschicht wird eine Feuchtequelle modelliert, die maximal 36 l $m^{-2}h^{-1}$ Wasser im Zeitraum von April – September einträgt. Die Feuchtequelle wird durch die Wasserspeicherfähigkeit (Sättigungsfeuchtegehalt) des Substrats begrenzt. Ist diese erreicht, wird kein weiteres Wasser eingespeist.

Das Simulationsprogramm DELPHIN erlaubt die Definition vielfältiger Ausgaben (insgesamt 92 verschiedene physikalische Größen), die durch den Nutzer frei wählbar sind. Diese können als Einzelwerte (Felder) oder als Integral- oder Mittelwerte sowohl räumlich als auch zeitlich definiert werden. Beim Gründachmodell liegt der Fokus auf wenigen, gezielt ausgewählten Größen, wie etwa dem Temperaturfeld, das in einem 12-stündigen Intervall ausgegeben werden soll.

Feldgrößen werden in größeren Zeitabständen angegeben, um keine übergroßen Ausgabedateien zu erzeugen. Alle weiteren Größen werden im 1-h-Takt ausgegeben, um neben Jahresgängen auch Tagesgänge adäquat abzubilden.

Die Wärmestromdichte (W/m^2 im 1 h-Takt) an der Außenoberfläche gibt die Information über die eingetragene Solarstrahlung, den langwelligen Strahlungsaustausch und den konvektiven Wärmeaustausch mit der Umgebung. Die Wärmestromdichte an der Innenoberfläche gibt die Information über den konvektiven Wärmeaustausch mit dem Innenraum. Das zeitliche Integral der Wärmestromdichte innen ergibt die über den Gesamtzeitraum übertragene Wärmemenge zwischen Innenraum und Dachkonstruktion. Das Feuchtegehaltsfeld gibt Aufschluss über die Verteilung der Feuchte in der Dachkonstruktion zu jedem Ausgabezeitpunkt. Für die räumliche Auflösung ist die Diskretisierung entscheidend. In jedem Volumenelement gibt es einen Feuchtegehalt (wie auch eine Temperatur). Für die zeitliche Auflösung wurde wieder ein 12-h-Takt gewählt. Um den Feuchtegehalt der Substratschicht als Einzelgröße zu charakterisieren, wird ein

volumengewichteter mittlerer Wassergehalt (in Vol% im 1 h-Takt) der Schicht ausgegeben. Die Gewichte ergeben sich aus der Diskretisierung. Zusätzlich wird der Feuchtegehalt des Teils der Substratschicht ausgegeben, in dem die Wasserzuführung erfolgt.

7.3 Ergebnisse

7.3.1 Modellergebnisse zu Temperatur-, Feuchte- und Wärmeströmen bei bedarfsgesteuerter Bewässerung

Die Simulation wurde über insgesamt 3 Jahre ausgeführt, wobei die Klimadaten des Standorts zyklisch angewendet wurden (3-mal das gleiche Jahr in Folge). Auch das Innenklima und das Bewässerungsregime wiederholen sich im jährlichen Zyklus.
Da es sich bei dem Gründachmodell um ein 1D-Modell handelt, können die Temperatur- und Wassergehaltsfelder in den grafischen Darstellungen über Ort und Zeit gezeigt werden (bei einer 2D-Simulation würde y-Ort über x-Ort dargestellt werden und diese Darstellung - ähnlich einem Film - über die Zeit laufen gelassen).
In der Abbildung 89 sind links das Temperaturfeld und rechts das Wassergehaltsfeld dargestellt. Die Zeit der Bewässerung von April bis September ist im dritten Jahr hervorgehoben. Die höheren Wassergehalte in der Substratschicht sind deutlich durch die Blaufärbung zu erkennen.

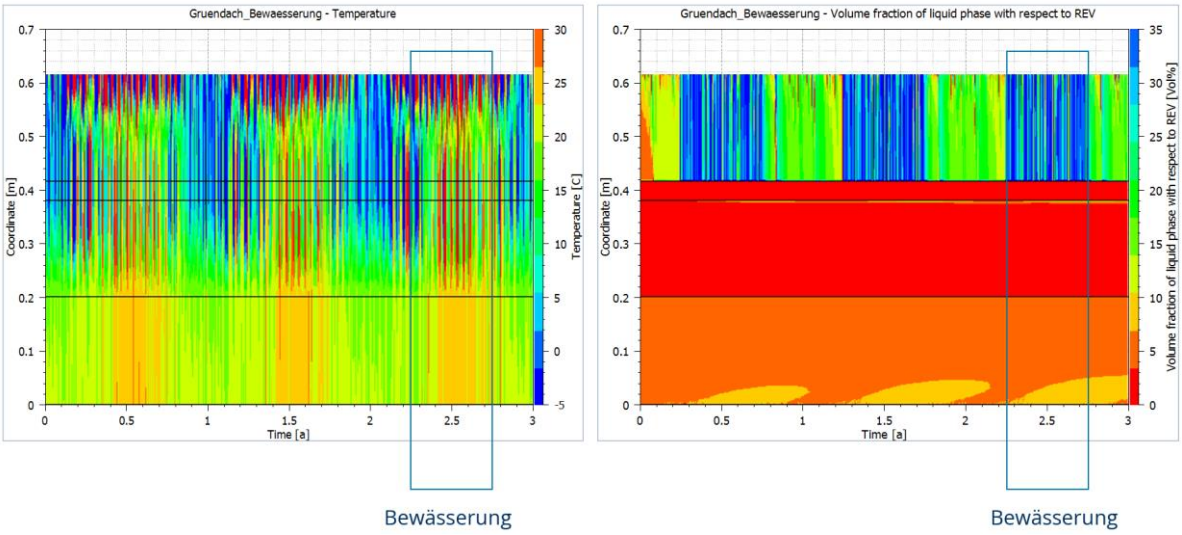
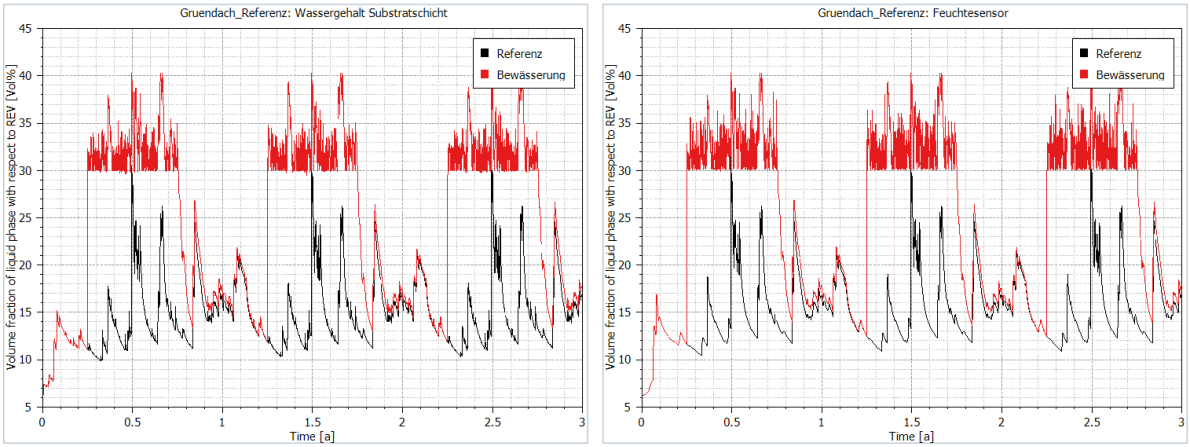


Abbildung 89: Temperatur- und Wassergehaltsfelder

Die Bewässerung folgt hier einer durch den lokalen Feuchtegehalt geregelten Quelle. Sinkt der Wassergehalt unter 30 Vol%, schaltet sich die Bewässerung ein. Da zusätzlich Regen auf die Oberfläche fällt und in das Substrat eindringt, können dort auch höhere Feuchtegehalte als 30 Vol% auftreten.

In den beiden Grafiken (Abb. 90) sind der Wassergehalt in der Substratschicht und in der Ebene der Feuchtequelle (Sensor) dargestellt. Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen der Referenz ohne Bewässerung und der Variante mit Bewässerung zu sehen. Ohne Bewässerung wird ein Feuchtegehalt von 30 Vol% nur einmal pro Jahr in der Spitze

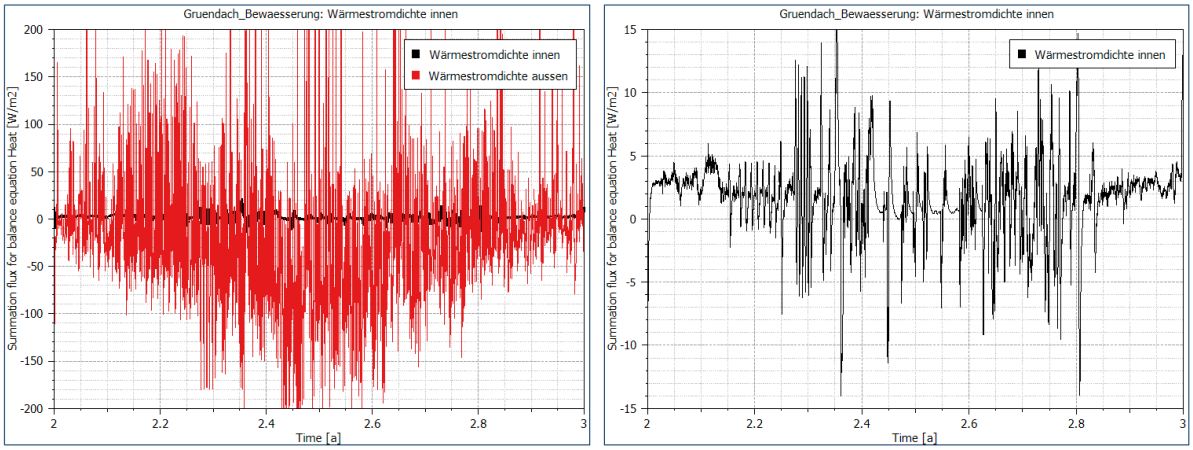
erreicht. Dagegen befindet sich der Feuchtegehalt mit Bewässerung in der Bewässerungszeit komplett oberhalb von 30 Vol%.



Minimaler Wassergehalt = 30 Vol% - unter dem die Bewässerung eingeschaltet wird

Abbildung 90: Mittlere Wassergehalte in Substrat und Feuchtesensor

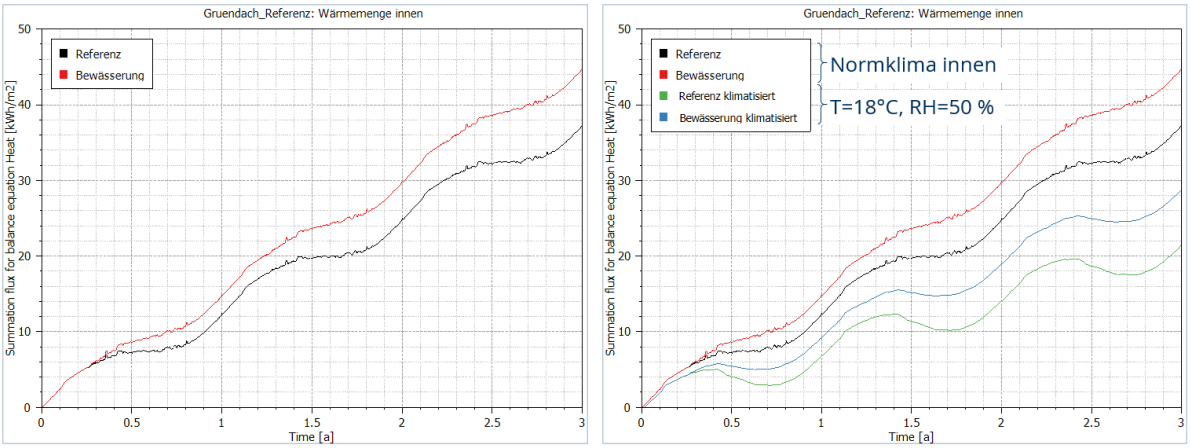
Die Wärmestromdichte fluktuiert außen wegen der Strahlungseinflüsse wesentlich stärker als innen. Während außen Werte zwischen +/-200 W/m^2 auftreten, beläuft sich die Schwankungsbreite innen nur auf +/-15 W/m^2 (Abb. 91). Der Verlauf ist in der rechten Grafik noch einmal in größerer Auflösung dargestellt.



Positiv = Wärmefluss von Innenraum in Konstruktion
Negativ = Wärmefluss von Konstruktion in Innenraum

Abbildung 91: Wärmestromdichten

Die zeitlichen Integrale der Wärmestromdichten innen erreichen in diesen Fällen die Größenordnung 40 kWh/m^2, d.h. auf ein Jahr bezogen ca. 13 kWh/m^{2}a. In Abbildung 92 ist links der Unterschied zwischen ohne bzw. mit Bewässerung zu sehen. Rechts sind beide Fälle mit klimatisierten Innenraumbedingungen zu sehen. Während im nicht klimatisierten Fall beide Kurven (abgesehen von Kurzzeiteffekten) stetig ansteigen, nimmt bei Klimatisierung der auf 18 °C gekühlte Raum im Sommer auch Wärme über die Dachkonstruktion auf, was die integral durch die Konstruktion abgeführte Wärmemenge reduziert und in einer zusätzlichen Klimatisierungslast des Raumes resultiert.



Positiver Anstieg = von Konstruktion aus dem Raum aufgenommene Wärme
Negativer Anstieg = von Konstruktion an den Raum abgegebene Wärme

Abbildung 92: Wärmemengen über Innenoberfläche

Die Differenz der beiden Kurven kann als Kühlpotential des bewässerten Gründachs definiert werden. Dies beläuft sich hier auf ca. 2.5 kWh/m^{2}a. Flächenbezug ist hier die Dachfläche. Im Vergleich dazu liegen Heizenergiebedarfe von Gebäuden je nach Effizienzklasse zwischen 30 – 250 kWh/m^{2}a, wobei hier der Flächenbezug die zu beheizende Grundfläche ist. Der Kühlenergiebedarf kann grob mit ca. ¼ des Heizenergiebedarfs abgeschätzt werden.

7.3.2 Variantenuntersuchungen auf Grundlage standortspezifischer Parameter

Die in den nachfolgenden Unterkapiteln verwendete Codierung der Varianten erfolgt so, dass aus dem Code alle Parameterwerte ablesbar sind, die in die Variantenuntersuchung eingeflossen sind (Tab. 21). Ausgehend von einer Referenz werden Varianten durch Variation eines Hauptparameters unter Berücksichtigung weiterer Nebenbedingungen abgeleitet.

Tabelle 21: Codierung der Variantenuntersuchung (gelblich markierte Felder zeigen die Referenzvariante)

Parameter	Codes				Werte
Substratschichtdicke	klein (S10)	groß (S20)			10 / 20 cm
Dämmschichtdicke	klein (D5)	mittel (D10)	groß (D18)		5 / 10 / 18 cm
Bewässerung	unbewässert (BWU)	minimal (BW4)	medial (BW2)	maximal (BW1)	Bewässerung nach Zeitplan 2.4 l/m2 alle 4 / 2 / 1 Tage, 1. Apr-15.Nov
Wasserspeicher-fähigkeit	gering (SAT30)	mittel (SAT40)	groß (SAT50)		Sättigung = 30 / 40 / 50 Vol%
Klimatisierung	keine (WTA)	mittel (T20)	stark (T18)		WTA-Standard, 20°C 50 %, 18°C, 60 %

7.3.2.1 Variation der Bewässerung

Im ersten Schritt wird die Art der Bewässerung (Varianten siehe Tab. 22) betrachtet.

Tabelle 22: Codierung der Varianten für die Variation der Bewässerung

Variante	Codierung	Abgeleitet aus	Variation	Weitere Neben-bedingung
Var00 (Referenz)	Gründach_S20_D18_**BWU**_SAT40_WTA	-	unbewässert	-
Var01	Gründach_S20_D18_**BW4**_SAT40_WTA	Var00	Bewässerung min	-
Var02	Gründach_S20_D18_**BW2**_SAT40_WTA	Var00	Bewässerung med	-
Var03	Gründach_S20_D18_**BW1**_SAT40_WTA	Var00	Bewässerung max	-

Nach Abstimmung mit den Forschungspartnern wird ein Bewässerungsregime definiert, welches von Anfang April bis Mitte November 2.4 l/m² täglich / alle 2 Tage / alle 4 Tage durch Tröpfchenbewässerung aufbringt. Da die Bewässerung nur in den Morgenstunden erfolgt, ergeben sich daraus 0.8 l/m²/h in der Zeit von 6:00-9:00 Uhr. Daraus wurde ein Zeitplan für die Simulation erstellt, der die entsprechenden Werte ganzjährig angibt.

An den Feuchtefeldern (Abb. 93) ist zu sehen, dass die Bewässerung alle 4 Tage zu keinen großen Veränderungen gegenüber der unbewässerten Variante führt. Der Regeneinfluss dominiert das Geschehen.

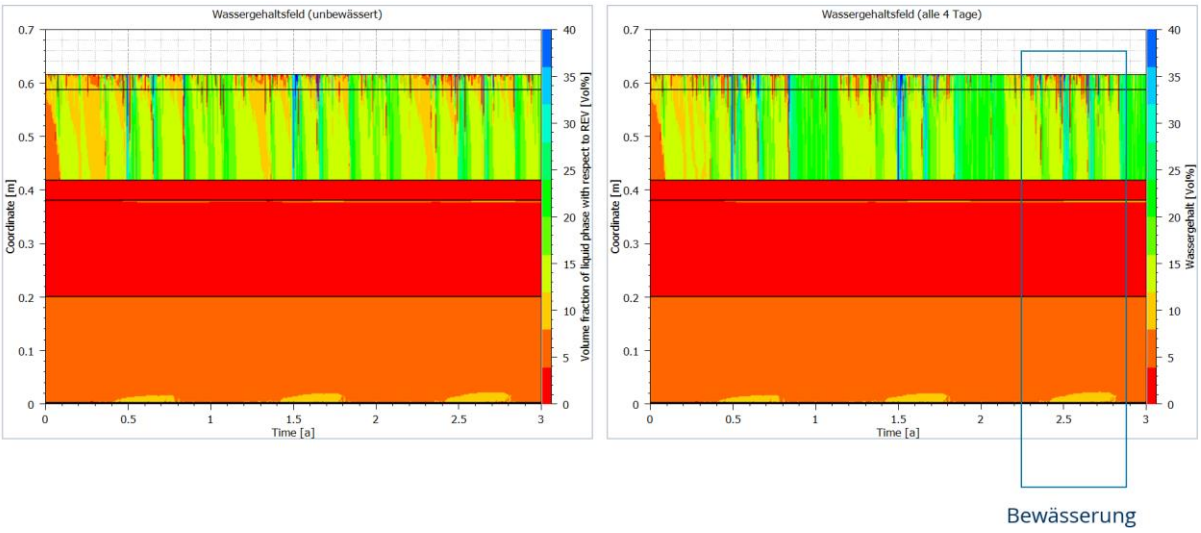


Abbildung 93: Wassergehaltsfelder für das unbewässerte und das minimal bewässerte Forschungsfeld

Bei einer täglichen Bewässerung (maximales Regime, Abb. 94), ist ein deutlicher Unterschied zur Referenz erkennbar. Allerdings braucht das Substrat länger Zeit für die Akkumulation von höheren Feuchtegehalten, die auch erst nach längerer Zeit nach dem Aussetzen der Bewässerung wieder abklingen.

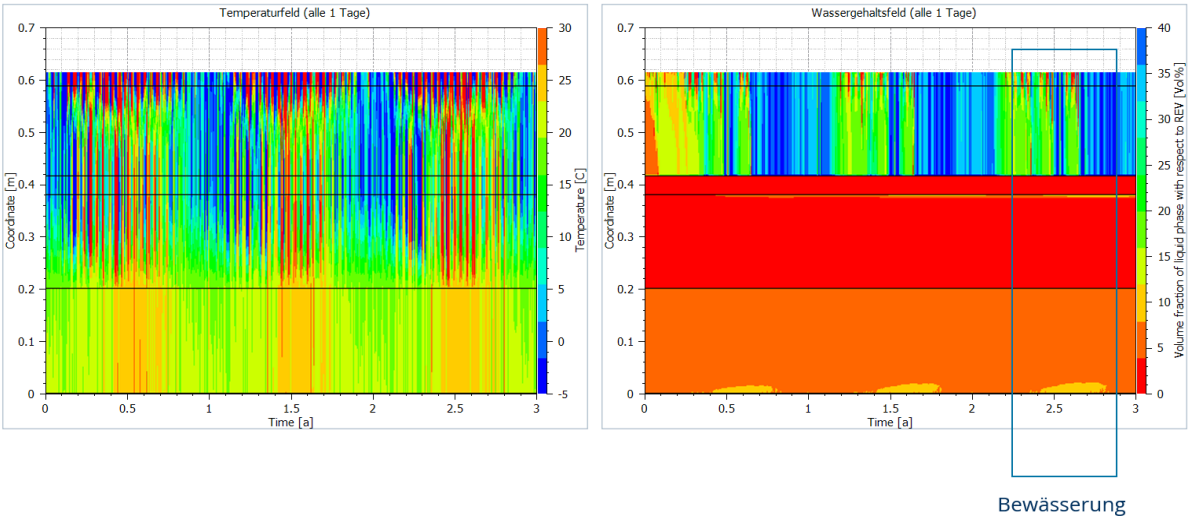


Abbildung 94: Temperatur- und Wassergehaltsfeld für das maximal bewässerte Forschungsfeld

Der Vergleich der Zeitverläufe (Abb. 95) der Wassergehalte der Substratschicht unterstreicht die Aussage. Die tägliche Bewässerung unterscheidet sich deutlich von den anderen Varianten. Dauerhaft hohe Feuchtegehalte akkumulieren erst im September und klingen erst im Februar wieder ab.

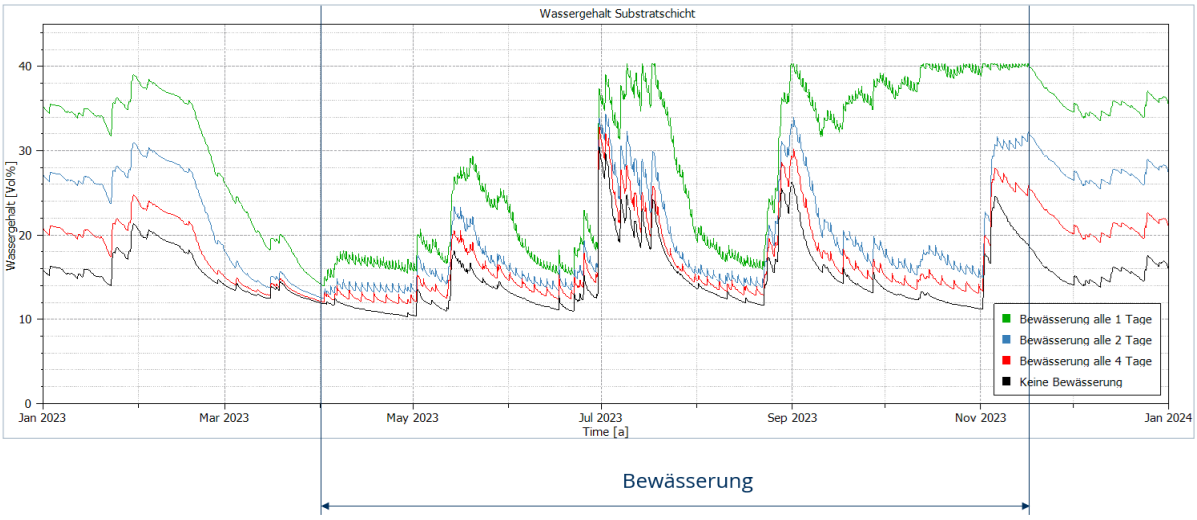


Abbildung 95: Wassergehalte der Forschungsfelder unter verschiedenen Bewässerungsregimen im Zeitverlauf

Die Betrachtung der integralen Wärmemengen der täglich bewässerten Variante und der unbewässerten Referenz liefert ein Kühlpotential von ca. 2.1 kWh/m²/a (Abb. 96). Für die Varianten mit Bewässerung alle 2 und 4 Tage sinkt das Kühlpotential entsprechend.

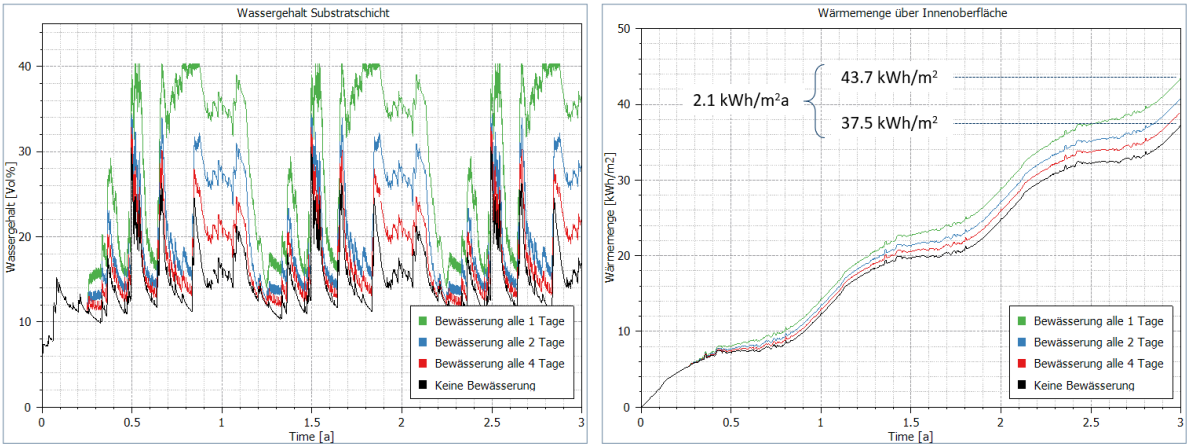


Abbildung 96: Wassergehalte in der Substratschicht über mehrere Jahre sowie die Wärmemengen über der Innenoberfläche der Forschungsfelder unter verschiedenen Bewässerungsregimen

7.3.2.2 Variation der Dämmstoffdicke

Als nächstes sollte die Dämmstoffdicke in zwei Schritten variiert werden. Dabei werden die Bewässerungsvarianten alle 2 und 4 Tage nicht mehr mit betrachtet, d. h. von den Varianten 00 und 03 ausgehend werden vier neue Varianten mit jeweils 10 und 5 cm Dämmstoffdicke erstellt (Tab. 23).

Tabelle 23: Codierung der Varianten für die Variation der Dämmstoffdicke

Variante	**Codierung**	**abgeleitet aus**	**Variation**	**Weitere Neben-bedingung**
Var04	Gründach_S20_**D10**_BWU_SAT40_WTA	Var00	Mittlere Dämmung	unbewässert
Var05	Gründach_S20_**D10**_BW1_SAT40_WTA	Var03	Mittlere Dämmung	Bewässerung max
Var06	Gründach_S20_**D05**_BWU_SAT40_WTA	Var00	Geringe Dämmung	unbewässert
Var07	Gründach_S20_**D05**_BW1_SAT40_WTA	Var03	Geringe Dämmung	Bewässerung max

Die Abbildung 97 zeigt die Gegenüberstellung der drei verschiedenen Dämmstoffdicken.

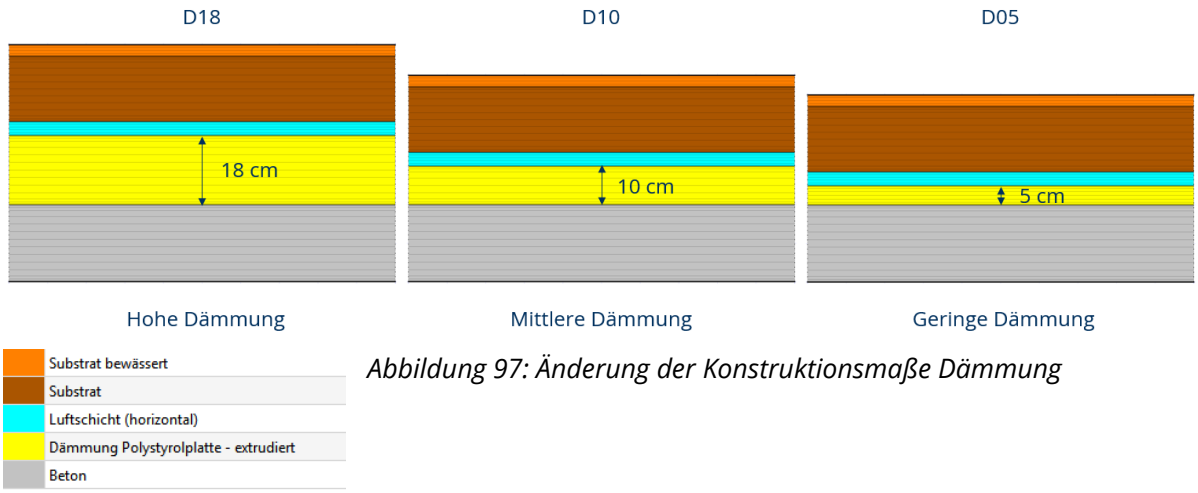


Abbildung 97: Änderung der Konstruktionsmaße Dämmung

Im Ergebnis stehen sechs Varianten (drei Dämmstoffdicken vs. zwei Bewässerungsregime), die drei Werte für das Kühlpotential liefern. Es zeigt sich, dass das Kühlpotential von 2.1 kWh/m²a auf 6.3 kWh/m²a steigt, wenn die Dämmung entsprechend verringert wird (Abb. 98). Allerdings überwiegen die zusätzlichen Wärmeverluste im Winter rein bilanziell die Erhöhung des Kühlpotentials im Sommer. Um diesen Effekt primärenergetisch zu bewerten, müssten die Arten der Wärme- und Kälteerzeugung und deren Energieträger bekannt sein. Darüber wird hier keine Aussage getroffen.

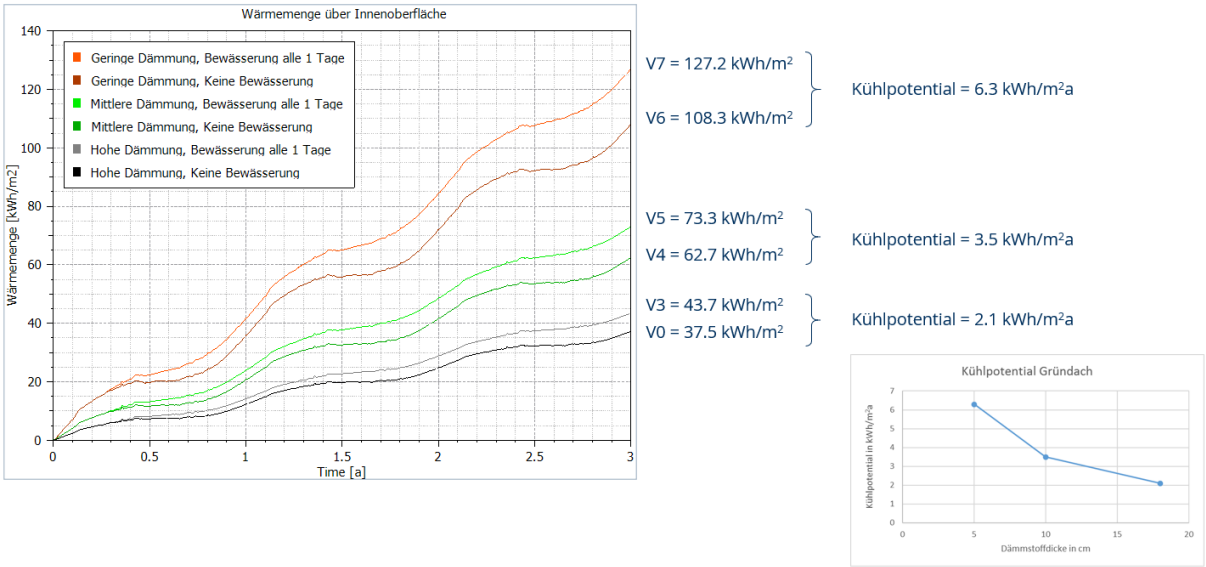


Abbildung 98: Einfluss der Dämmstoffdicke auf die Wärmemenge über der Innenoberfläche bei a) keiner Bewässerung und b) maximaler Bewässerung

7.3.2.3 Variation der Wasserspeicherfähigkeit

Im dritten Schritt soll die Wasserspeicherfähigkeit des Substrats erhöht werden. Dabei werden zwei Varianten mit geringer und großer Dämmstoffstärke gegenübergestellt (Tab. 24).

Tabelle 24: Codierung der Varianten für die Variation der Wasserspeicherfähigkeit

Variante	Codierung	abgeleitet aus	Variation	Weitere Neben-bedingung
Var08	Gründach_S20_**D18**_BW1_SAT50_WTA	Var00	Große Wasserspeicherfähigkeit	Große Dämmung
Var09	Gründach_S20_**D05**_BW1_SAT50_WTA	Var03		Geringe Dämmung

Die Änderung der Substrateigenschaft Wasserspeicherfähigkeit erfolgt durch das Heraufsetzen des Sättigungsfeuchtegehaltes von 40 auf 50 Vol%. Damit steht mehr Porenvolumen für die Wasserspeicherung zur Verfügung. Das betrifft primär die Feuchtespeicherfunktion, die nun über einen größeren Wertebereich definiert ist. In der Konsequenz müssen auch die Wärmeleitfähigkeit und die kapillare Flüssigwasserleitfähigkeit über einen größeren Feuchtebereich 0-50 Vol% (oder 0-0.5 m³/m³) definiert werden.

Die Abbildung 99 stellt die entsprechenden Materialfunktionen der beiden Varianten gegenüber. Zu beachten ist, dass die maximale Wärmeleitfähigkeit bei Sättigung von 1.5 auf 1.6 W/m/K steigt, was einen thermischen Effekt haben könnte. Auch die kapillare Flüssigwasserleitfähigkeit steigt bei einem höheren Sättigungswert.

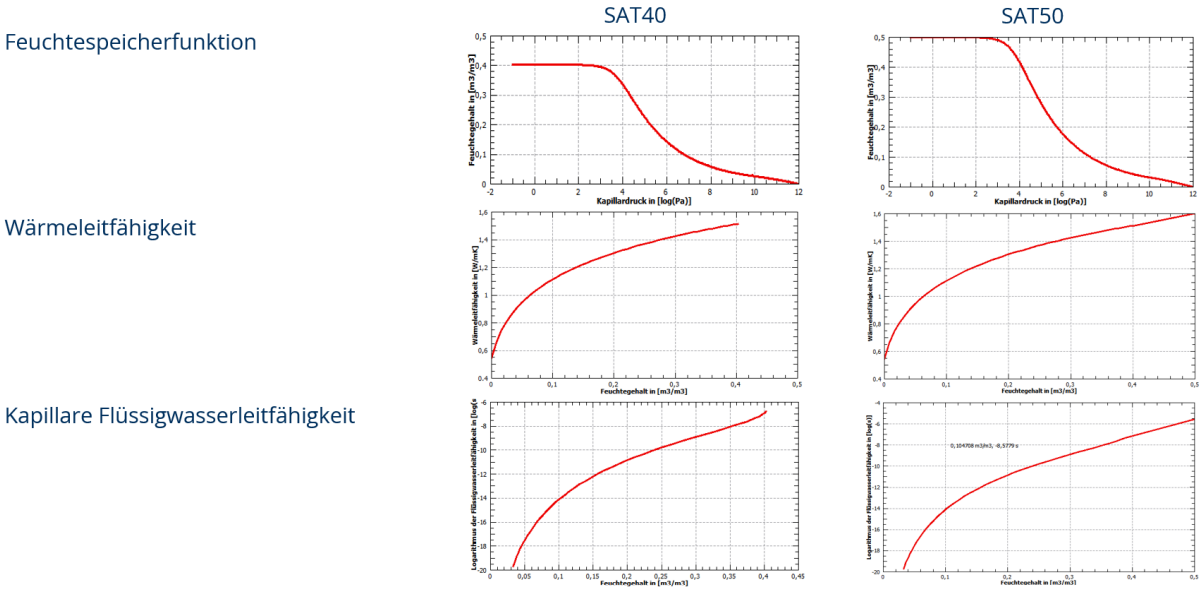


Abbildung 99: Änderungen der Substrateigenschaften bei einem Sättigungsfeuchtegehalt von 40 Vol% und 50 Vol%.

Der Effekt der höheren Wasserspeicherfähigkeit ist deutlich am Verlauf des Wassergehaltes in der Substratschicht zu sehen (Abb. 100). Allerdings ändert das nichts am Kühlpotential. Die Verläufe der integralen Wärmemengen sind nahezu identisch. Die Anwesenheit von mehr Wasser in der Substratschicht verändert zwar die Wärmeleitfähigkeit geringfügig, was sich bei geringer Dämmstoffdicke etwas mehr bemerkbar macht. Allerdings sind diese Effekte gegenüber der Verdunstungskühlung

wesentlich kleiner. Für die Generierung eines größeren Kühlpotentials braucht es eine größere Verdunstungsrate. Die höhere Wasserspeicherfähigkeit hat keinen wesentlichen Effekt.

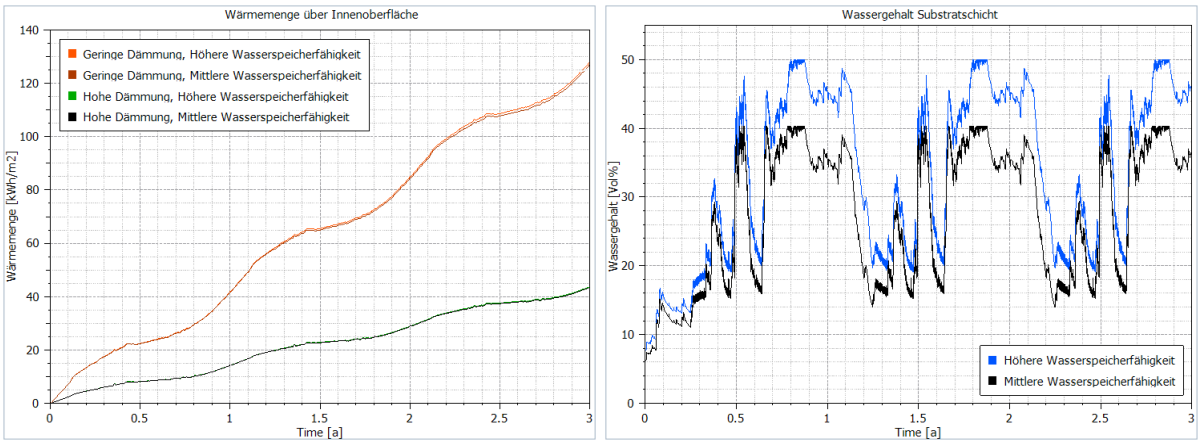


Abbildung 100: Auswirkungen der Wasserspeicherfähigkeit auf die Wärmemenge über der Innenoberfläche sowie dem Wassergehalt in der Substratschicht

7.3.2.4 Variation der Innenraumklimatisierung

Im nächsten Schritt wird die Klimatisierung des Innenraumes untersucht. Es wird in drei weiteren Varianten von jeweils 18°C / 60 % - Konstantklima ausgegangen, die sich durch die Bewässerung und Wasserspeicherfähigkeit unterscheiden (Tabelle 25).

Tabelle 25: Codierung der Varianten für die Variation der Innenraumklimatisierung

Variante	Codierung	abgeleitet aus	Variation	Weitere Neben-bedingung
Var10	Gründach_S20_D18_BWU_SAT40_T18	Var00	starke Klimatisierung	Unbewässert
Var11	Gründach_S20_D18_BW1_SAT40_T18	Var03		Bewässerung max
Var12	Gründach_S20_D18_BW1_SAT50_T18	Var08		Bewässerung max + große Wasserspeicher-fähigkeit

Die Ergebnisse der drei stark klimatisierten Varianten werden hier der Referenz mit unklimatisiertem Innenraum gegenübergestellt (Abb. 101). Die gesamte über die Innenoberfläche geflossene Wärmemenge sinkt deutlich bei den klimatisierten Varianten. Zwischen den maximal bewässerten Varianten und der unbewässerten Variante gibt es wieder den erwartbaren Unterschied im Kühlpotential, wohingegen die Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit zu keiner weiteren Änderung der Wärmemenge führt.

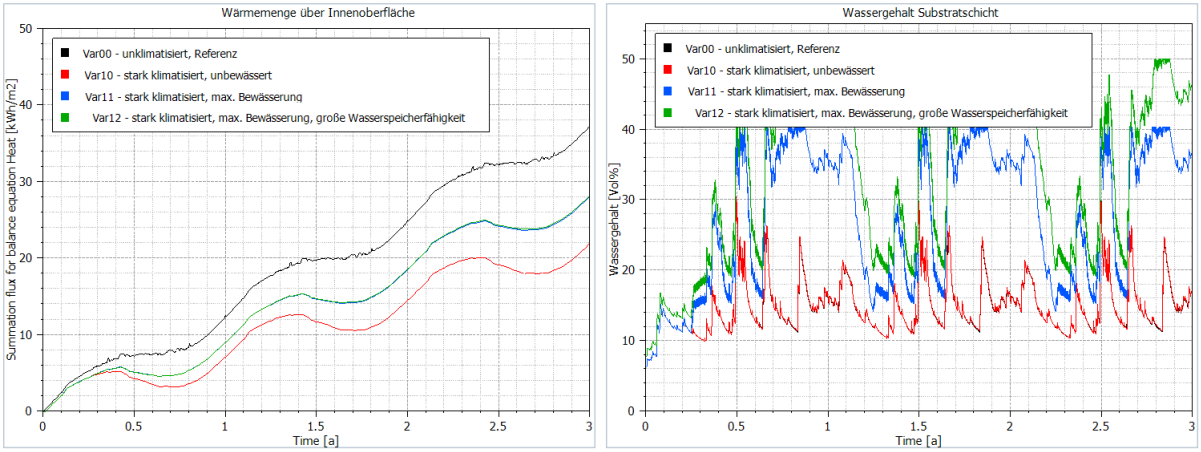


Abbildung 101: Auswirkungen der Bewässerungsmenge auf einen stark klimatisierten Innenraum gegenüber eines unklimatisierten Innenraums mit unbewässerter Dachbegrünung (Referenz)

7.3.2.5 Variation der Substratschichtdicke

Im letzten Variantenschritt wird die Substratschichtdicke auf 10 cm herabgesetzt und dabei die Bewässerung und Klimatisierung variiert (Tabelle 26).

Tabelle 26: Codierung der Varianten für die Variation der Substratschichtdicke

Variante	**Codierung**	**abgeleitet aus**	**Variation**	**Weitere Neben-bedingung**
Var13	Gründach_S10_D18_BWU_SAT40_WTA	Var00	Geringe Substrat-schichtdicke	Unbewässert, keine Klimatisierung
Var14	Gründach_S10_D18_BW1_SAT40_WTA	Var03		Bewässerung max, keine Klimatisierung
Var15	Gründach_S10_D18_BW1_SAT40_T18	Var11		Bewässerung max + starke Klimatisierung

Die Wassergehalte der Substratschicht ändern sich mit der Dicke. Die dünnere Substratschicht zeigt bei gleicher Regenexposition erwartungsgemäß höhere Feuchtegehalte (Vergleich schwarze und rote Kurven, Abb. 102). Auf das Kühlpotential hat die Substratschichtdicke einen vernachlässigbaren Einfluss. Erst die Bewässerung zeigt wieder den Effekt. Bei maximaler Bewässerung und starker Klimatisierung hat auch die Veränderung der Substratschichtdicke keinen Einfluss (vgl. Var15 mit Var11 und Var12).

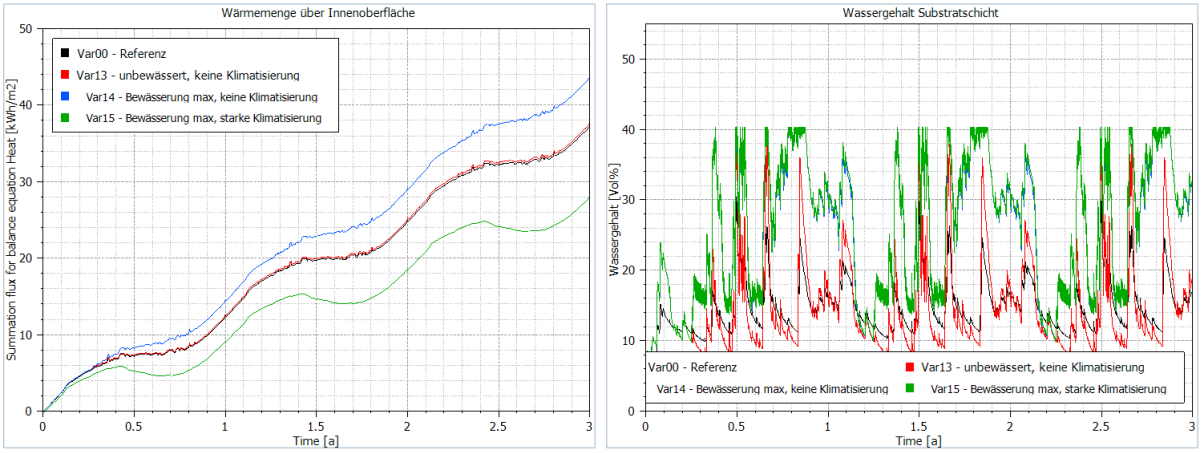


Abbildung 102: Auswirkungen einer geringen Substratschichtdicke

7.4 Verifikation

Zum Abschluss soll verifiziert werden, ob modellbedingte systematische Fehler ausgeschlossen werden können. Da das Modell keine Evapotranspiration berücksichtigt, geht die Verdunstungsleistung der Vegetation nicht mit ein. Auch die Kapillarwirkung von Wurzeln wurde bislang nicht mit betrachtet. Erwartungsgemäß realisiert sich dieses Kühlpotential im Außenbereich und hat keinen maßgeblichen Einfluss auf das Kühlpotential im Innenraum. Dies soll abschließend durch eine Abschätzung geprüft werden.

Zur Prüfung wird die Verdunstungsleistung an der Oberfläche derart erhöht, indem der konvektive Dampfübergangskoeffizient auf den maximal möglichen Wert gestellt wird. Bislang wurde mit dem in der Bauphysik üblichen Wert von $7.5e^{-08}$ s/m gerechnet, nun wird dieser in Variante 16 auf um fünf Größenordnungen auf $1e^{-02}$ s/m erhöht. Da die Verdunstungsleistung von der Dampfdruckdifferenz Oberfläche zu Umgebung abhängt, muss auch genügend Wasser an die Oberfläche transportiert werden, um einen Effekt zu erzielen. Deshalb wird in Variante 17 zusätzlich die kapillare Flüssigwasserleitfähigkeit der Substratschicht deutlich hochskaliert, um die Transportleistung der Wurzeln (Wurzelwirkung) zu approximieren.

Der Vergleich von Var03, Var16 und Var17 mit der Referenz zeigt, dass der Zugewinn an Kühlpotential marginal ist (Abb. 103). Die Wurzelwirkung erbringt sogar einen geringfügig gegenteiligen Effekt. Es ist also davon auszugehen, dass das Modell mit den bisherigen Parametern nicht systematisch falsch liegt und die errechneten Kühlpotentiale realistisch sind.

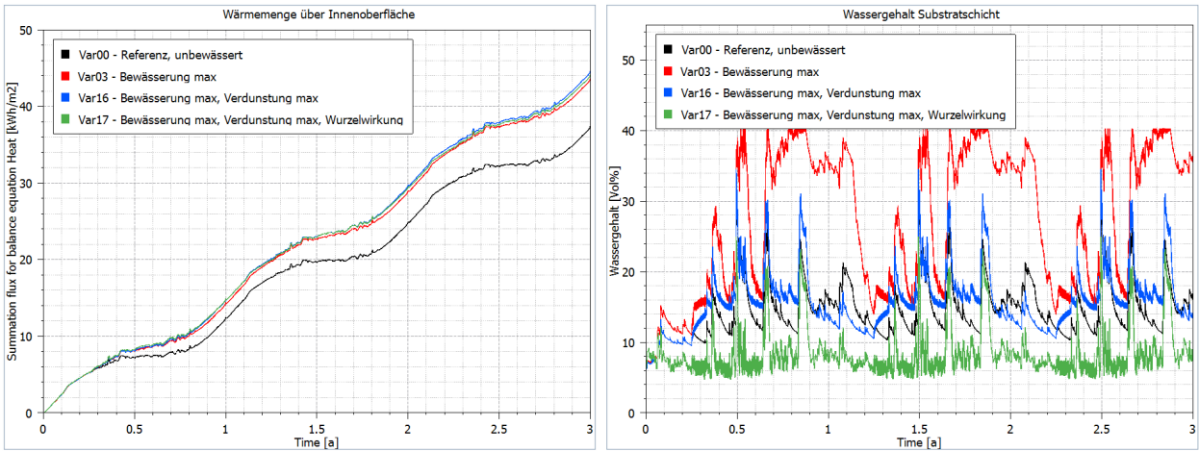
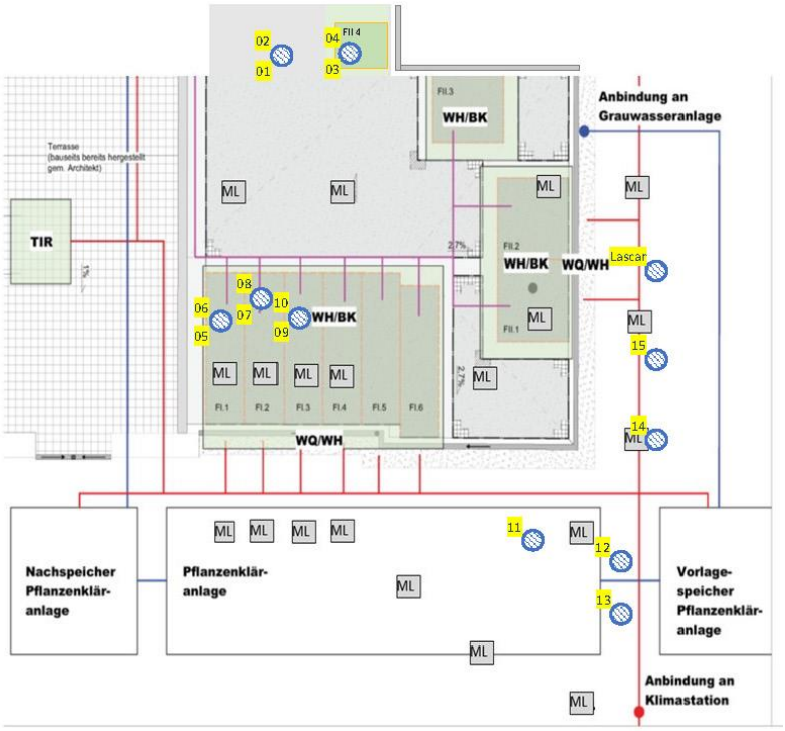


Abbildung 103: Verifikation mittels einer Maximierung der Verdunstung (konvektiver Dampfübergang an der Oberfläche) und einer Maximierung der Wurzelwirkung (kapillarer Flüssigwassertransport im Substrat)

8. Stadtklimatische Bewertung (Arbeitspaket 6)

8.1 Temperaturmessungen auf dem Gründach

Zur Untersuchung des nächtlichen Kühleffektes des Gründachs wurden insgesamt 16 Temperatur-Feuchte-Logger (Typ EL-USB-2 der Firmen OMEGA bzw. Lascar Electronics) auf dem Gründach und seiner nahen Umgebung installiert (Abb. 104). Die ungeraden und geraden Wertepaare von 01-10 (01/02, 03/04, usw.) bezeichnen jeweils zwei an der gleichen Haltstange in den Höhen 50 cm bzw. 85 cm über Grund angebrachten Sensoren (Abb. 105).



Temperatur-Feuchte-Sensor

Abbildung 104: Schema des Gründachs mit den zusätzlichen Temperatursensoren (Lorz, 2023)

Abbildung 105: Messsensoren in den Höhen 50 cm und 85 cm über Grund am 12.07.23 (links) und am 12.09.23 (rechts) (Lorz, 2023)

Die Messungen erfolgten im Zeitraum 12.07.-16.10.23, die Daten wurden mit einem Messintervall von 5 Minuten aufgezeichnet. Zur Bewertung der Kühlwirkung wurden die Messdaten mit folgenden Kriterien gefiltert und zu Stundenmitteln zusammengefasst:

- Sommermonate Juli und August
- Zeitintervall zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang
- Bewölkung größer-gleich oder kleiner 4/8 (Trennung zwischen bewölkten und klaren Sommernächten)
- Windschwache Wetterlagen (Windgeschwindigkeit <1,5 m/s)

Basierend auf diesen Kriterien konnten insgesamt 290 Werte für bewölkte oder bedeckte Nächte und 122 Werte für klare oder wenige bewölkte Nächte im Sommer 2023 ausgewertet werden. Die Abbildungen 106, 107 bzw. 108 zeigen die Verteilung der stündlichen Temperaturwerte im Juli bzw. August 2023, gemessen mit den Sensoren auf dem Gründach (MIW01 bis MIW10) und seiner nahen Umgebung (MIW11 und höher). Insgesamt bleiben die mittleren **Unterschiede in klaren Nächten mit ca. 1 K im Juli und 0,7 K im August** gering. Die niedrigsten Minima wurden dabei an den Sensoren 01 und 03 bestimmt. Dort befindet sich der unbewässerte Bereich mit lockerer niedrigwüchsiger Vegetation. Gleichzeitig zeigt der Vergleich der Sensorpaare 01/03 (50 cm über Grund) mit 02/04 (85 cm über Grund), dass die Kühlwirkung mit sinkendem Abstand zur Unterlage zunimmt. Eine signifikante Kühlwirkung des Gründachs in seine Umgebung hinein konnte aufgrund der beschränkten Dimension des Gründachs nicht nachgewiesen werden. Bei Betrachtung ausschließlich **bewölkter Sommernächte** im Juli verringert sich die Abkühlwirkung des Gründachs um 1-2 K im Vergleich zu den klaren Nächten, und die **lokalen Unterschiede** auf dem Dach gehen auf **ca. 0,5 K** zurück und liegen damit im Bereich der Messunsicherheit der Temperatursensoren (Abbildung 107 zu 108).

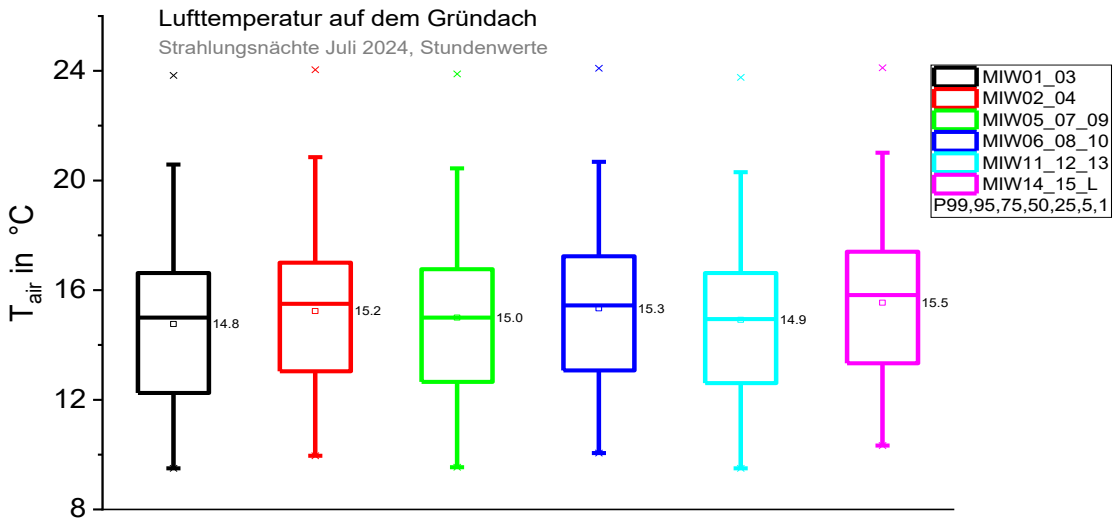


Abbildung 106: Temperaturverteilung auf dem Gründach in klaren Sommernächten im Juli 2023

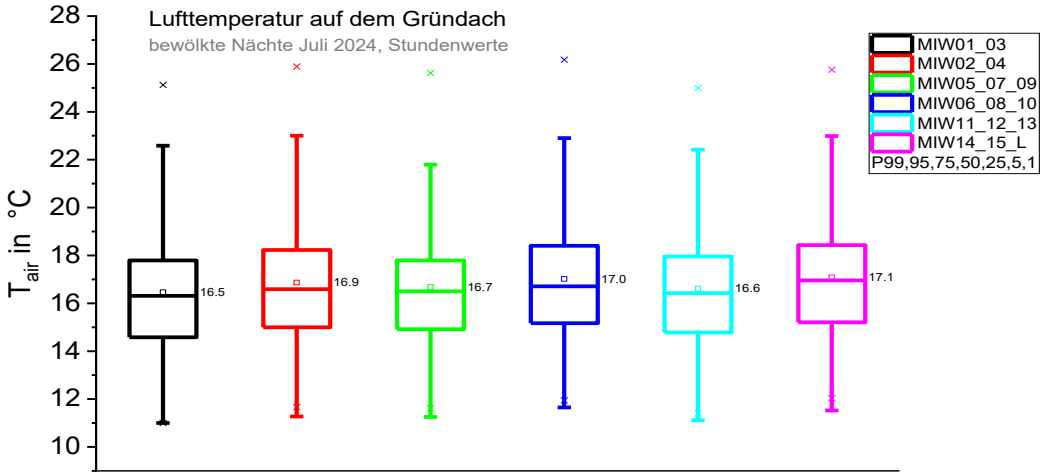


Abbildung 107: Wie Abb. 106, aber in bewölkten Sommernächten

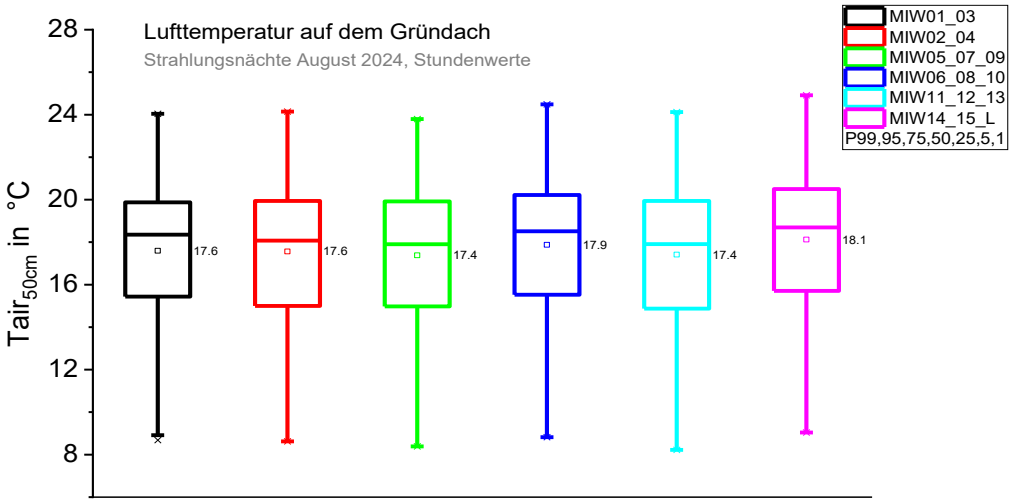


Abbildung 108: Wie Abb. 106 für August 2023

8.2 Dauermessungen am Gründach

Die Dauermessungen an der Klimastation des Gründachs und des IR-Sensor am Dienstgebäude wurden in den Jahren 2023 und 2024 kontinuierlich fortgesetzt. Dies ermöglicht eine weiterführende Analyse des Einflusses von Witterung und Bewuchs auf die Verteilung der IR-Temperatur auf den bewässerten und unbewässerten Gründachbereichen.

8.2.1 Messungen an der Klimastation

Niederschlag

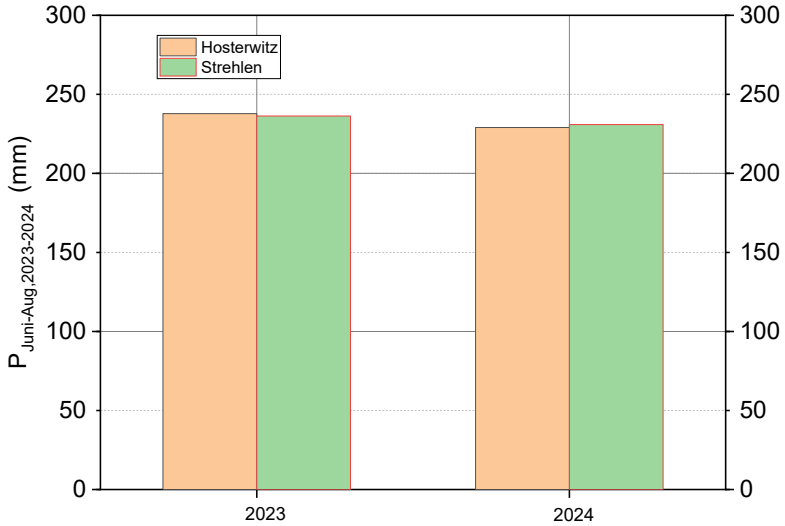


Abbildung 109: Niederschlagssummen der DWD Stationen im Dresdner Elbtal, Juni-August 2023 und 2024

Temperatur

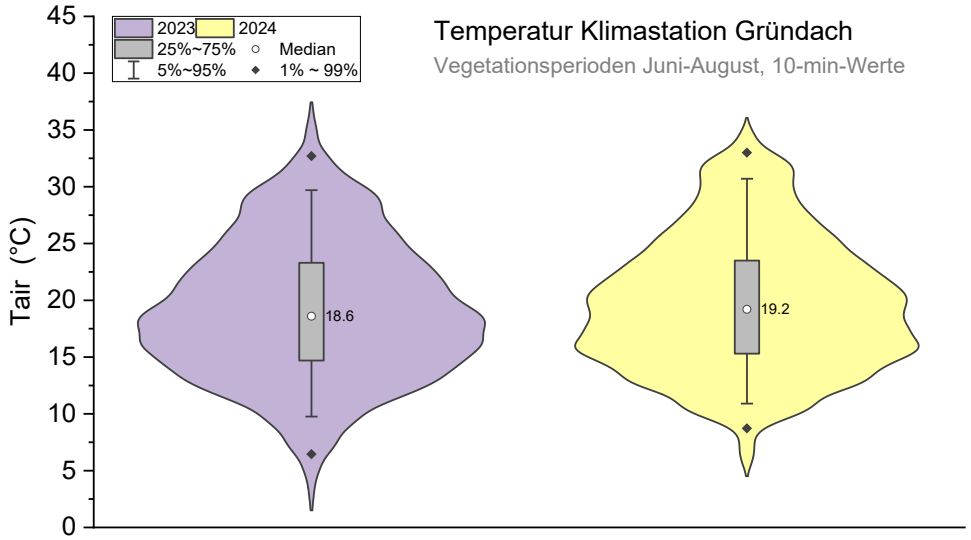


Abbildung 110: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur an der Klimastation Gründach in den Sommermonaten 2023 und 2024

Die Verteilung des Niederschlags (Abb. 109), der Lufttemperatur (Abb. 110) und der Globalstrahlung (Abb. 111) zeigt bzgl. Niederschlag vergleichbare Witterungsbedingungen in den Sommermonaten der Jahre 2023 und 2024. Der Sommer 2024 war etwas wärmer (Abb. 110) und strahlungsreicher (Abb. 111) als der Sommer 2023.

Globalstrahlung

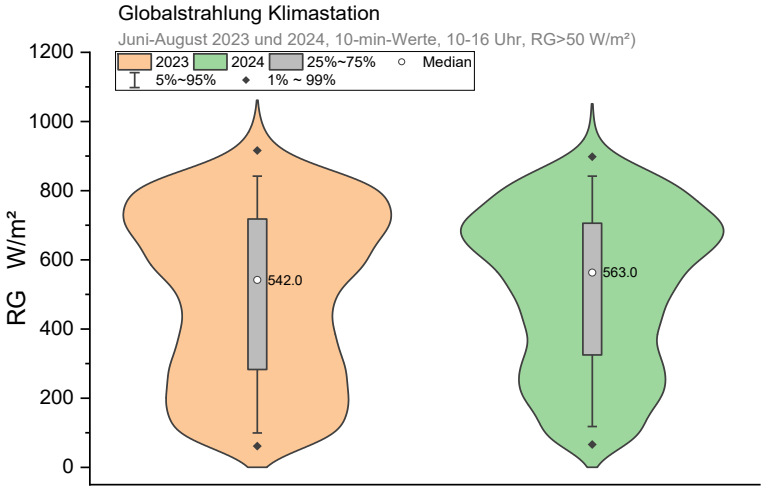


Abbildung 111: Häufigkeitsverteilung der Globalstrahlung an der Klimastation Gründach in den Sommermonaten 2023 und 2024, Tagstunden 10-16 Uhr

8.2.2 Messung der Oberflächentemperatur des Gründachs

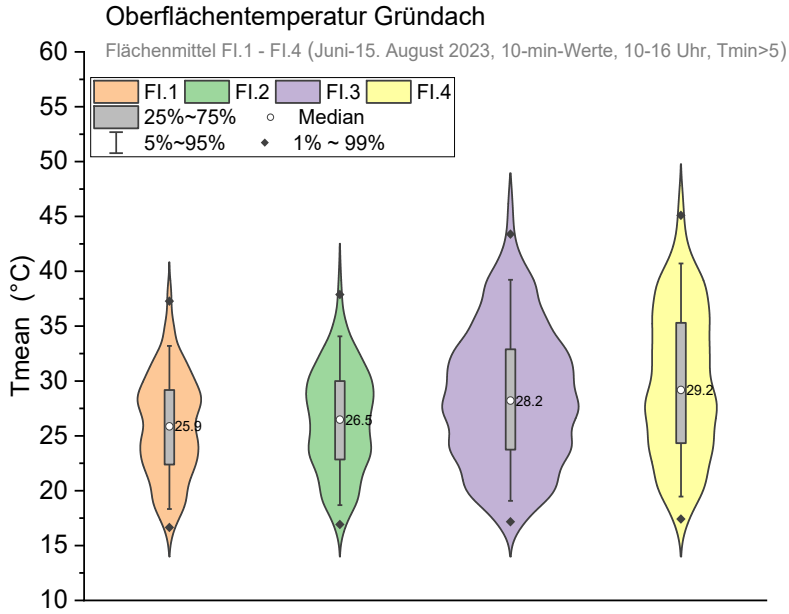


Abbildung 112: Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperatur an der Klimastation Gründach vom 01.06.-15.08.2023, Tagstunden 10-16 Uhr

(Einzelwerte unter 5 °C in den Tagstunden im Sommer sind unplausibel und wurden bei der Mittelwertsbildung ausgeschlossen)

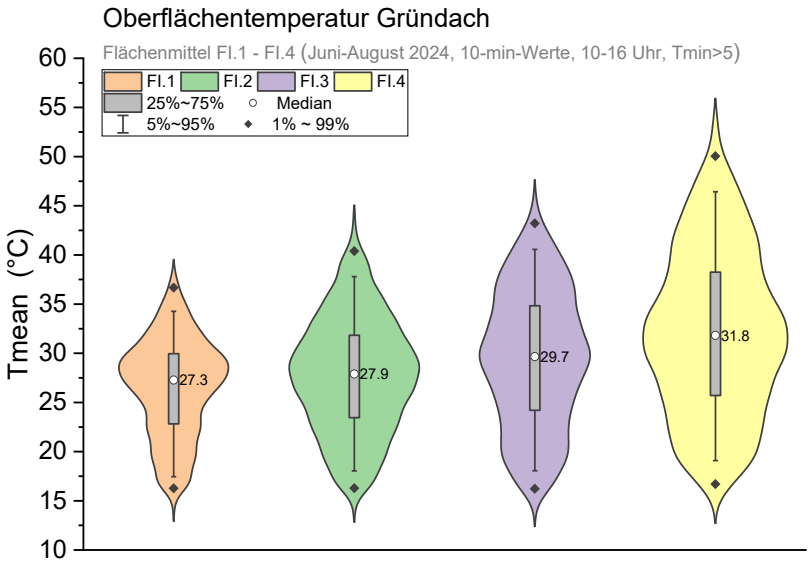


Abbildung 113: Häufigkeitsverteilung der mittleren Oberflächentemperatur an der Klimastation Gründach in den Sommermonaten 2024, Tagstunden 10-16 Uhr

(Einzelwerte unter 5 °C in den Tagstunden im Sommer sind unplausibel und wurden bei der Mittelwertsbildung ausgeschlossen)

In Abbildung 112 und 113 ist die Häufigkeitsverteilung der mittleren Strahlungstemperatur Tmean der Gründachfelder Fl.1 bis Fl.4 in den Sommermonaten der Jahre 2023 und 2024 für die Tagstunden 10-16 Uhr MEZ abgebildet. Neben den Unterschieden zwischen den Feldern treten auch interannuelle Unterschiede in denselben Feldern auf. So ist die mittlere Oberflächentemperatur in Fl.4 (extensiv begrüntes Sedumfeld) im Jahr 2023 3,3 K höher als in Fl.1 (maximal bewässerte Pflanzung), im Jahr 2024 4,5 K. Insgesamt weisen alle Felder eine höhere Temperatur in 2024 im Vergleich zu 2023 auf. Dabei unterscheiden sich die Tmean zwischen Fl.1 (Maximalbewässerung) und Fl.2 (Medialbewässerung) vergleichsweise wenig. Dies ist ein Hinweis darauf, dass bereits eine mediale Bewässerung einen deutlichen Effekt auf das Pflanzenwachstum und damit auf die Oberflächentemperatur hat. Mögliche Ursachen für das höhere Temperaturniveau vergleichbarer Flächen in 2024 sind:

- Stärkerer Einfluss der etwas höheren solaren Einstrahlung und Umgebungstemperatur
- Ausfälle in der Bepflanzung und verspäteter Beginn der Bepflanzung infolge von Insektenkalamitäten

8.3 Modellierung mit ENVI-met

8.3.1 Modell-Setup

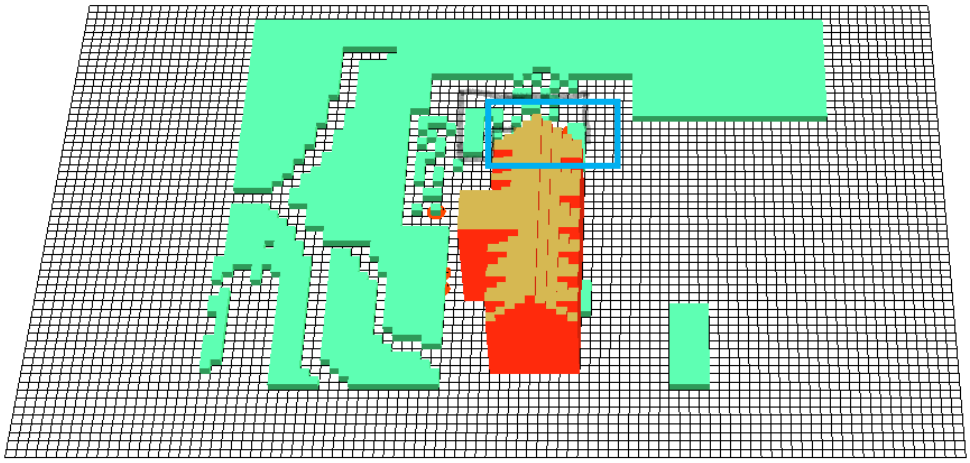


Abbildung 114: Modellgebiet in ENVI-met mit dem Gründach (blaues Rechteck) und seiner Umgebung (3D Ansicht).

Mit Hilfe der Modellierungssoftware ENVI-met (Version 5.6.1, https://envi-met.com, SINSEL, 2022) wurde die Wirkung unterschiedlicher Pflanzendichte bei unterschiedlichen Beschattungsverhältnissen im Bereich der bewässerten Gründachbereiche untersucht. Dabei wurden folgende Modelleinstellungen verwendet:

- Simulationsgebiet: 94m x 60m, Gitterabstand 1m (Abb. 114)
- Simulation: 15.07, 05:00 bis 17.07., 05:00 (48 h), wolkenlos
- Ausgewerteter Simulationstag: 16.07.

Startbedingungen 05:00:

- Wind 10 m über Grund: 90°/2 m/s
- Lufttemperatur 2m über Grund: 20°C
- Luftfeuchte 2m über Grund: 60%

8.3.2 Wirkung von Bepflanzung und Gebäudeschatten auf die Temperatur, Modellergebnisse im Vergleich mit Messwerten

In den Modellergebnissen ist der Einfluss des **Gebäudeschatten**s auf den Bereich des Gründachs zu unterschiedlichen Tageszeiten deutlich erkennbar (Abb. 115). Die Ergebnisse passen gut zu den Messwerten des IR-Sensors, bei denen der Schattenwurf am frühen Nachmittag in einer deutlichen Reduzierung der Oberflächentemperatur zu erkennen ist (vgl. Lohaus et al., 2023).

Für die detaillierte Auswertung des simulierten Tagesgangs von Solarstrahlung und Lufttemperatur wurden den bewässerten Flächen FI.1-6 spezielle Rezeptorpunkte zugewiesen (rote Punkte in Abb. 116). Dabei sind die Rezeptoren 01-06 auf den bewässerten Feldern FI.1-6 platziert.

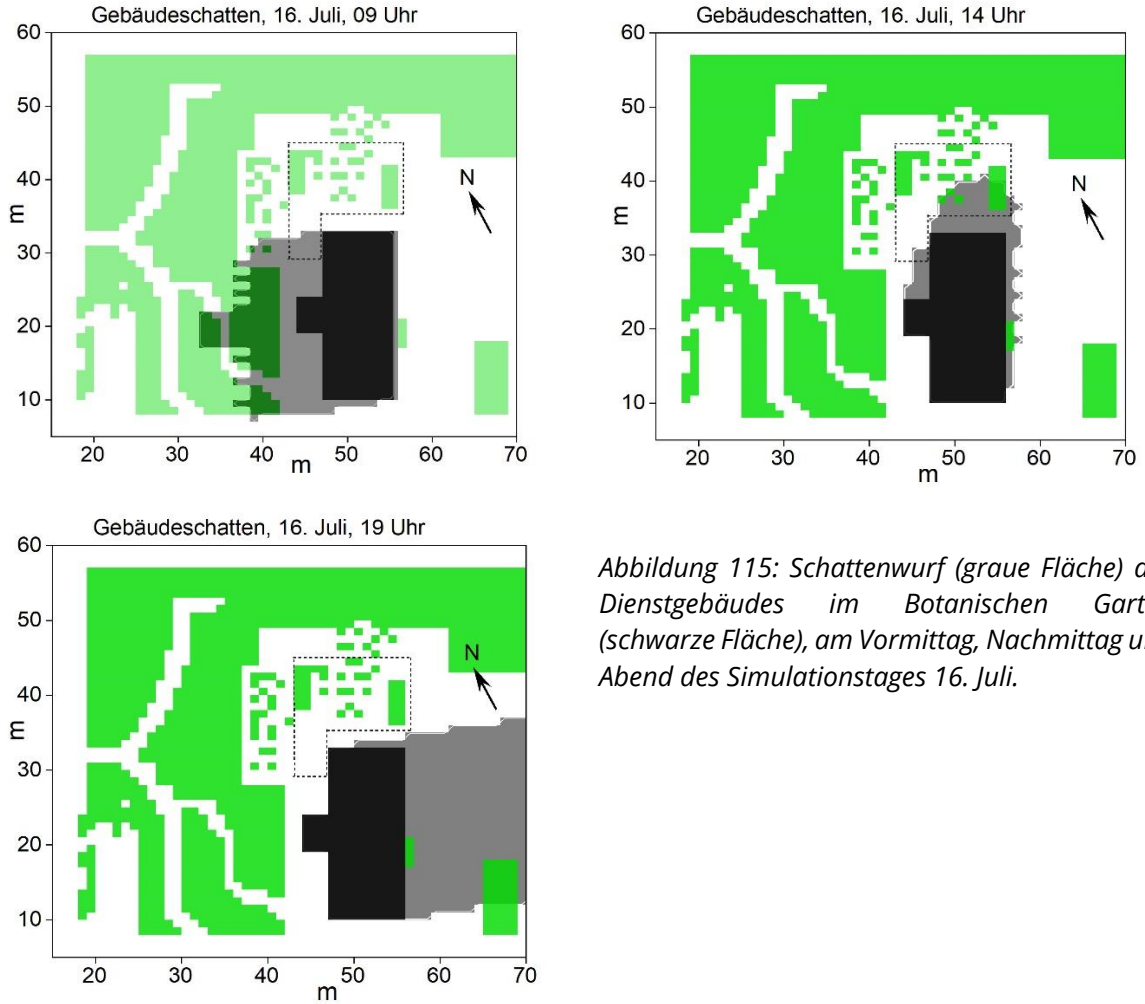


Abbildung 115: Schattenwurf (graue Fläche) des Dienstgebäudes im Botanischen Garten (schwarze Fläche), am Vormittag, Nachmittag und Abend des Simulationstages 16. Juli.

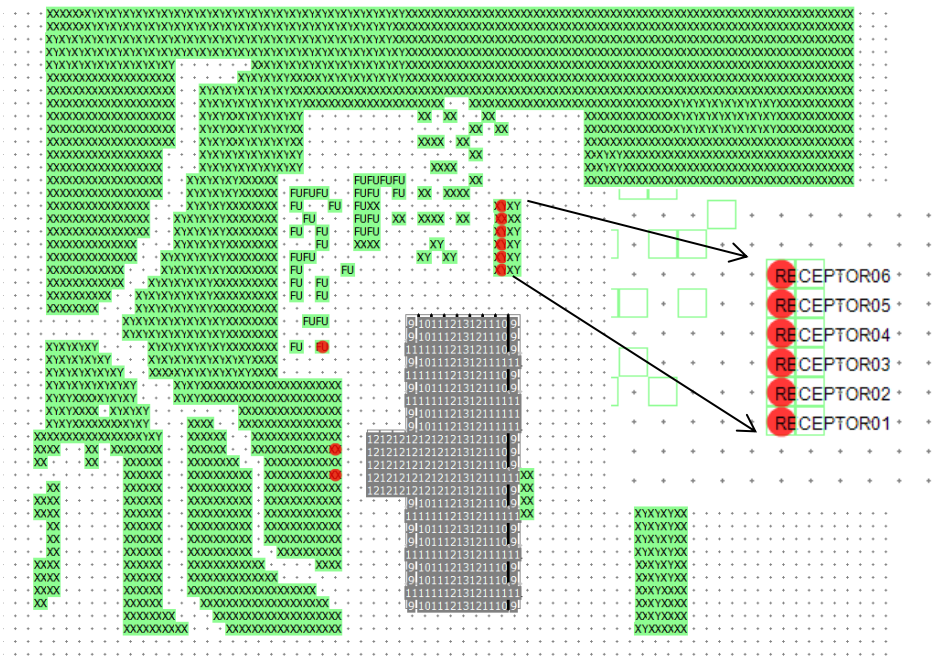


Abbildung 116: Modellgebiet in ENVI-met mit dem Gründach und seiner Umgebung (2D Ansicht). Die Rezeptorpunkte 1-6 sind auf den Feldern Fl.1-6 platziert.

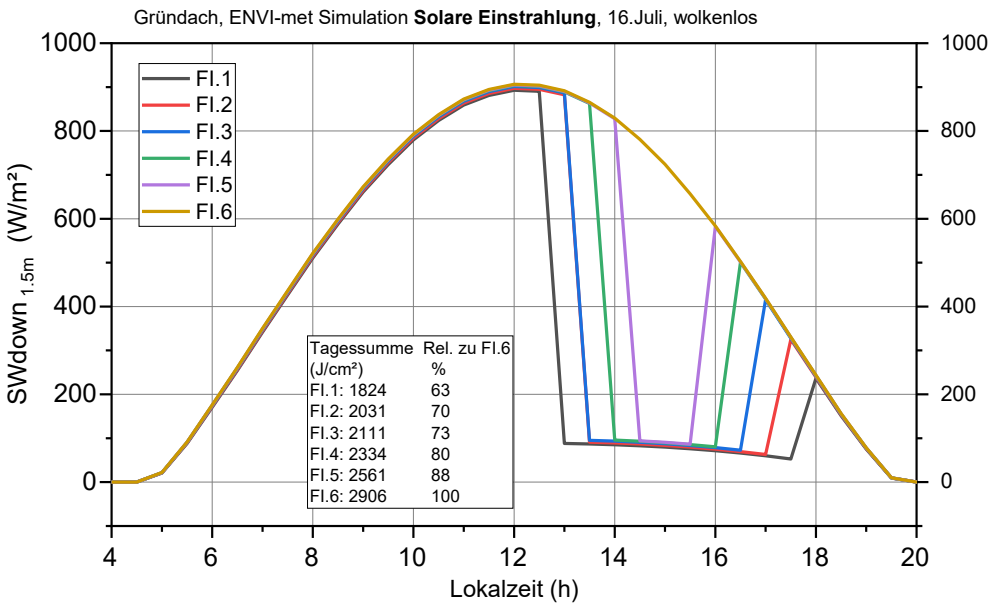


Abbildung 117: Tagesgang der solaren Einstrahlung an den Rezeptorpunkten FI.1-6 am simulierten wolkenlosen Sommertag 16. Juli.

In Abbildung 117 ist die Wirkung des Gebäudeschattens auf die solare Einstrahlung abhängig vom Abstand des Rezeptorpunktes zum Gebäude gut erkennbar. Die Dauer der Beschattung beeinflusst deutlich die Strahlungssumme des Tages. So erhält das Lysimeterfeld FI.1 für den simulierten Sommertag nur ca. 63 % der solaren Einstrahlung im Vergleich zu FI.6, wo praktisch kein Gebäudeschatten auftritt.

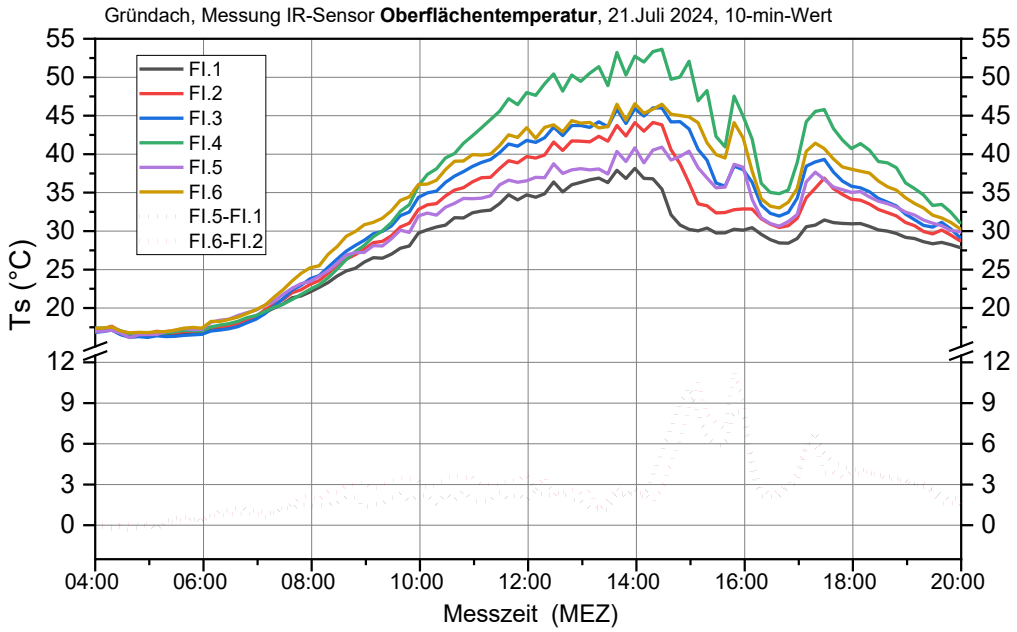


Abbildung 118: Tagesgang der mittels IR Sensor gemessenen mittleren Oberflächentemperatur auf den Flächen FI.1-6 für einen mit der Modellsimulation vergleichbaren Sommertag (21.07.2024).

Dies hat unmittelbare Konsequenzen für die gemessene mittlere Oberflächentemperatur Ts der betrachteten Flächen (Abb. 118). Die niedrigste Ts wird erwartungsgemäß auf FI.1 gemessen, wo sich geringere solare Einstrahlung mit dichterem Bewuchs kombiniert. Die

höchste Ts ist auf Fl.4 mit spärlicher „Sedum"-Bepflanzung zu finden. Obwohl die Flächen Fl.5 bzw. Fl.6 die gleiche Bewässerung erhalten wie Fl.1 bzw. Fl.2, werden dort zum Tagesmaximum ca. 10 K höhere mittlere Ts registriert (Abb. 118 unten) – ein Ergebnis der höheren solaren Einstrahlung im Vergleich zu Fl.1 und Fl.2, die zur gleichen Zeit im Gebäudeschatten liegen. Aber auch in den Vormittagsstunden, bei gleicher solarer Einstrahlung auf allen Flächen, weisen Fl.5 und Fl.6 ca. 2-3 K höhere Ts auf als Fl.1 und Fl.2. Die ist möglicherweise ein Hinweis darauf, dass die regelmäßige Beschattung in Hausnähe zur Mittagszeit die Verdunstung auf den Flächen Fl.1 und Fl.2 reduziert, damit mehr Wasser für das Pflanzenwachstum zur Verfügung steht und das Pflanzenwachstum gefördert wird. Die **zeitweise Beschattung** eines Gründachs, insbesondere in den Mittagsstunden, wirkt sich also in Kombination mit Bewässerung günstig auf den Pflanzenwasserhaushalt und damit **wachstumsfördernd** auf die Gründachvegetation aus.

Die Unterschiede in der solaren Einstrahlung resultieren in Unterschieden der Lufttemperatur nahe der Gründachoberfläche (Abb. 119). Die größten simulierten Temperaturdifferenzen treten am Nachmittag zwischen Fl.1 und Fl.6 unter dem Einfluss unterschiedlicher Beschattung mit maximal 0.8 K auf. Bei gleichmäßiger Besonnung aller Felder am Vormittag beträgt der reine Kühleffekt der Vegetation je nach Pflanzendichte maximal 0.1 K (Differenz Fl.1 zu Fl.4).

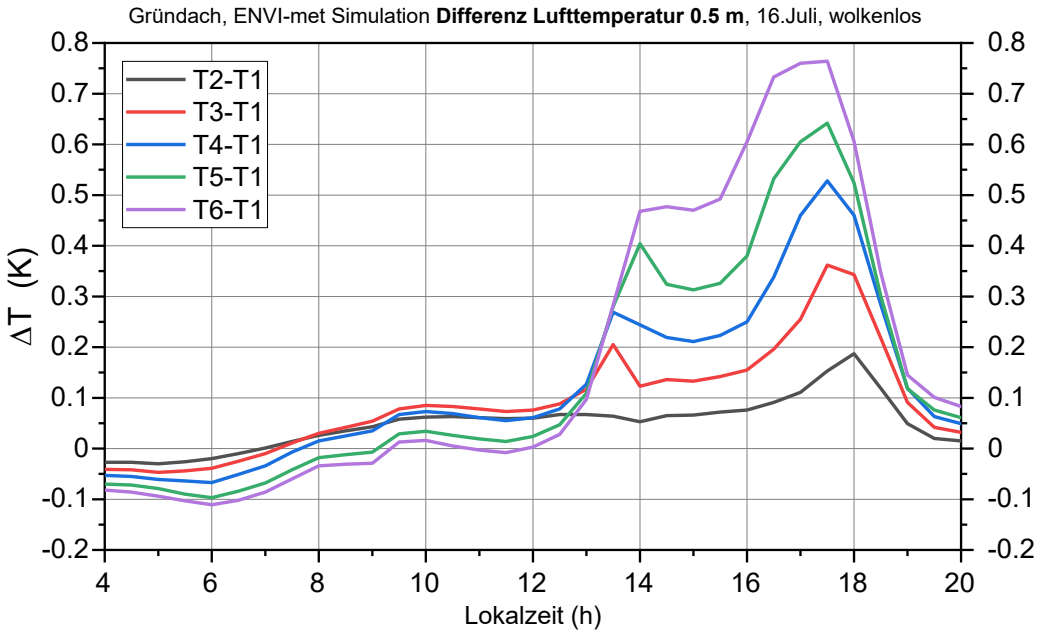


Abbildung 119: Tagesgang der Lufttemperatur in 0.5 m Höhe über dem Gründach. Differenz der Rezeptorpunkte Fl.2-5 zu Fl.1 am simulierten wolkenlosen Sommertag 16. Juli.

Dies entspricht in etwa den gemessenen Unterschieden in der Nacht (Kap. 8.1). **Der simulierte Kühleffekt durch Beschattung des Gründachs am Tage ist größer als der Kühleffekt durch Pflanzenverdunstung**. Für einen zeitlich zusammenfallenden Vergleich von Messwerten und Simulation bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen.

9. Querschnittsorientierte Diskussion der Ergebnisse und Fazit

9.1 Diskussion

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde erstmals eine einfach-intensive Dachbegrünung mit einer Substratstärke von 20 cm in typischer Einbausituation unter realen klimatischen Bedingungen mit ungereinigtem, lediglich mechanisch filtriertem Grauwasser bewässert. Das Forschungsvorhaben knüpft damit an die Untersuchungen der Vorjahre an, in denen die bereits vorhandenen 21 Forschungsfelder in unterschiedlichen Regimen mit 0,6 L/m²/d (minimales Regime), 1,2 L/m²/d (mediales Regime) und 2,4 L/m²/d (maximales Regime) ausschließlich mit geklärtem Grauwasser versorgt wurden (vgl. Lohaus et al., 2023).

Die Querschnittsanalyse zeigt, dass sowohl geklärtes als auch filtriertes Grauwasser grundsätzlich positive Effekte auf die Vegetationsentwicklung einfach-intensiver Dachbegrünungen haben. Die Ablaufkonzentrationen der untersuchten Stoffe sind – mit Ausnahme des zeitweise erhöhten Salzexports – bei den Grauwasser-bewässerten Flächen nicht systematisch höher als die der unbewässerten Flächen. Die räumlich und zeitlich verdichtete Erfassung der Lufttemperatur und Luftfeuchte auf dem Gründach und dessen näherer Umgebung zeigt das Potential des Gründachs, die Temperatur zu senken. Dabei ist die Kühlwirkung der bewässerten und dicht bewachsenen Forschungsfelder am Tage stärker, während spärlich bewachsene Abschnitte nachts besser abkühlen. Eine gesicherte Erfassung der mikroklimatischen Fernwirkung war aufgrund der zu geringen Ausdehnung des Gründachs nicht möglich. Die Untersuchungen des bauklimatischen Kühlpotenzials belegen zudem, dass eine maximale Bewässerung (tägliche Wassergabe) ein Kühlpotential von etwa 2,1 kWh/m²a erreichen kann. Die medialen und minimalen Regime (Bewässerung alle 2 bzw. 4 Tage) entfalten geringere Effekte, da hier überwiegend der natürliche Niederschlag wirkt. Eine Reduktion der Dämmstoffdicke von 18 cm auf 5 cm steigerte dabei das Kühlpotential auf bis zu 6,3 kWh/m²a, geht jedoch mit erhöhten Wärmeverlusten im Winter einher, wodurch sich der energetische Vorteil im Jahresverlauf relativiert.

Die Bewässerung der Dachbegrünung ist demnach nicht primär Selbstzweck, sondern ein gezielt einsetzbares Instrument zur Erreichung verschiedener Funktionen des Gründachs. Im Folgenden werden dazu Varianten der Zielsetzung kurz dargelegt: Ist eine Absenkung der Temperatur auf dem Dach am Tage gewünscht, lässt sich diese durch bewässerte, dicht bewachsene Vegetationsflächen mit hohem Pflanzenvolumen und entsprechendem Verdunstungspotenzial erreichen. Steht hingegen eine nächtliche Abkühlung im Vordergrund, kann der Verzicht auf Bewässerung in Kombination mit lückiger, niedrigwüchsiger Vegetation die nächtliche Abstrahlung begünstigen. In Bestandsgebäuden mit unzureichender Dämmung kann ein intensiv bewässertes Gründach mit dichter Vegetationsdecke einen sommerlichen Wärmeschutz leisten und so

technische Nachrüstungen zumindest teilweise ersetzen. Wird die Förderung der Biodiversität als übergeordnetes Ziel definiert, empfiehlt sich eine heterogene Gestaltung des Gründachs mit bewässerten und unbewässerten Teilflächen mit variierenden Pflanzenvolumen und Substratstärken.

Im Verlauf der zweijährigen Untersuchungskampagne 2023 und 2024 konnte nachgewiesen werden, dass auch ein technisch vereinfachtes Bewässerungssystem mit filtriertem Grauwasser für die untersuchten Arten als pflanzenverträglich einzustufen ist. Zudem deuten die Ergebnisse teils darauf hin, dass im filtrierten Grauwasser verbliebene Nährstoffe potenziell wachstumsfördernde Effekte bei den Pflanzungen aufweisen. Dabei ist zu erwähnen, dass neben der Bewässerung insbesondere die höheren Niederschlagsmengen in den Jahren 2023 und im zweiten Halbjahr in 2024 im Vergleich zu 2022 die Pflanzenentwicklung beeinflusst haben dürften. Diese Witterungsbedingungen führten dazu, dass die Unterschiede der Pflanzungen zwischen den verschiedenen Bewässerungsregimen in den Jahren 2023 und 2024 weniger stark ausgeprägt waren als im Jahr 2022. Die Regenwasserversorgung führte demnach zu einer recht ähnlichen Entwicklung der Versuchsfelder. Aus diesem Grund sind weiterführende Untersuchungen erforderlich, um die Langzeitwirkungen und pflanzenartspezifischen Reaktionen differenzierter beurteilen zu können.

Die Untersuchungen zur Pflanzenvitalität zeigten selbst bei den minimalen Bewässerungsregimen i. d. R. solide Ergebnisse. Ziel künftiger Untersuchungen sollte es daher sein, die minimale Wassermenge weiter zu reduzieren, um die erforderliche Menge zur Aufrechterhaltung der Pflanzenvitalität unter Extrembedingungen – insbesondere während sommerlicher Hitzeperioden – zu quantifizieren. Aktuelle Richtwerte für die Bewässerungsmenge von einfach-intensiven Dachbegrünungen liegen derzeit nicht vor. Hietel et al. (2020) untersuchten ein semi-intensives Dachbegrünungssystem als ein innovatives Klimaanpassungs- und Umweltschutzinstrument und bewässerten es bei geringer Substratmächtigkeit von unter 15 cm im Mittel mit 2 L/m²/d. Bereits mit dem derzeitigen Minimalregime (0,6 L/m²/d) konnte nachgewiesen werden, dass mit deutlich sparsameren Bewässerungsregimen gute Ergebnisse erzielt werden können.

In diesem Kontext wären zusätzlich Tests zur Verwendung von höher konzentriertem Grauwasser denkbar, da das Arbeitspaket 4 zeigte, dass die vor Ort gemessenen Konzentrationen an CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf), DOC (gelöster organischer Kohlenstoff), TN (Gesamtstickstoff), TSS (suspendierte Stoffe) und TP (Gesamtphosphor) teils deutlich unter gängigen Literaturwerten liegen. Dies würde ermöglichen, die Auswirkungen auf die Pflanzenvitalität näher zu untersuchen sowie Bewässerungsstrategien weiter zu optimieren und ggf. ressourcenschonender zu gestalten. Auch bei der sensorgesteuerten Bewässerung, z. B. unter Berücksichtigung der Pflanzenvitalität oder des Substratwassergehaltes (wie bereits in Lohaus et al. (2023) dargestellt) besteht eine Forschungslücke in der Verwendbarkeit marktüblicher

Bodenfeuchtesensoren zur Messung des Wassergehalts, die zu Steigerung der Verlässlichkeit weiter untersucht werden sollten.

Da die Untersuchungen zu filtriertem Grauwasser erst seit zwei Vegetationsperioden durchgeführt werden, sind die Ergebnisse noch nicht als validiert einzustufen. Eine Langzeitstudie ist erforderlich, um die pflanzenartspezifischen Reaktionen auf verschiedene Grauwasserqualitäten detaillierter zu verstehen und zu prüfen, ob auch langfristig keine negativen Auswirkungen durch Stoffakkumulationen entstehen. Weiterführende Forschung ist auch notwendig, um den Einfluss von extremen Hitzeperioden und wetterbedingten Schwankungen auf die Gründachsysteme besser abzubilden und darauf basierend empfohlene Bewässerungsstrategien zu entwickeln.

Ein Schädlingsbefall mit Dickmaulrüsslerlarven erschwerte gegen Ende des Jahres 2023 sowie zu Beginn des Jahres 2024 die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse, da die Larven teils erhebliche Schädigungen der Vegetation hervorriefen. Besonders betroffen waren in Gruppe 1 und 2 die Arten Geranium, Bergenie und Lysimachia, während Bistorta diesem Befall robust standhielt. Da die Felder der Gruppe 3 nur in geringem Maße von Dickmaulrüsslerlarven befallen waren, lassen sich auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse keine belastbaren Aussagen zur Schädlingsresistenz der Arten dieser Gruppe ableiten.

Die Ergebnisse der Arbeitspakete 2 und 6 zeigen übereinstimmend, dass der Gebäudeschatten bei den Forschungsfeldern der Gruppe 1 den Kühleffekt und auch die Vitalität der Pflanzen unterstützt. Simulationen, die in die Untersuchungen eingeflossen sind, bestätigen den positiven Einfluss des Schattens. Da Dachflächen i. d. R. keiner Verschattung unterliegen, ist eine gezielte Bewässerung – insbesondere während strahlungsintensiver und hitzebelasteter Sommermonate – unerlässlich, um Trockenstress vorzubeugen und das frühzeitige Einziehen oberirdischer Pflanzenteile zu verhindern. Resultierend kann ein gesteigertes Nahrungsangebot für Bestäuberarten wie Bienen und andere Insekten gewährleistet werden.

Die Weiterentwicklung der Bonitur von Gründachflächen durch die Automatisierung der Deckungsgraderhebung unter Verwendung einer punktwolkenbasierten Erhebungsmethodik (Arbeitspaket 3) hat sich als präzise und kosten- sowie zeiteffizient erwiesen. Diese Erhebungsmethodik birgt eine erhebliche Verbesserung gegenüber des bisherigen Aufnahmeverfahrens (mit gänzlich manueller bildbasierter Auswertung der UAV-Aufnahmen). Die Rekonstruktion von spärlich bewachsener Vegetation, insbesondere von feinstrukturierten Gräsern, stellte eine Herausforderung für die photogrammetrische Erfassung mittels Structure from Motion (SfM) dar. In diesen Fällen kann es zu unvollständigen oder lückenhaften Modellierungen kommen. Um die Aussagekraft und Genauigkeit der erfassten Vegetationsstrukturen zu verbessern, sollte der ergänzende Einsatz von Laserscanning-Technologien in zukünftigen Studien geprüft werden. Eine kombinierte Erhebung, z. B. durch UAV-gestützte Laserscanner-

befliegungen, könnte ermöglichen, die Datenqualität hinsichtlich Flächendeckung und Detailtiefe systematisch mit den Ergebnissen aus SfM zu vergleichen und Potenziale für methodische Optimierungen aufzuzeigen.

Der Verzicht auf die Verwendung einer Pflanzenkläranlage erhöht die Einsatzmöglichkeiten des Systems und kann als Grundlage für einen neuartigen Typus der Dachbegrünung dienen („Dauergründach“ oder „Grüngrauwasserdach“). Ein möglicher Vorteil des vereinfachten Systems ohne Pflanzenkläranlage liegt in der erhöhten Übertragbarkeit und Anwendbarkeit in der Praxis, insbesondere für verdichtete urbane Räume mit begrenztem Platzangebot. Der geringere technische Aufwand, die damit verbundene Kosteneffizienz sowie reduzierte Wasserverluste – durch die Verdunstung in der Pflanzenkläranlage – sprechen für den Einsatz von lediglich filtriertem, ungeklärtem Grauwasser. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass bewässerte Flächen und Grauwasseranfall gut aufeinander abgestimmt sein müssen. Beispielsweise entspricht der typische Grauwasseranfall eines Vierpersonenhaushalts von 240 Litern pro Tag der notwendigen Wassermenge für 395 m² bewässerter Dachfläche beim minimalen Regime (mit einem notwendigen Speichervolumina von 0,96 m³ bei einer Bewässerung alle 4 Tage) bzw. 99 m² beim maximalen Regime (Speichervolumina: 0,24 m³ aufgrund der täglichen Bewässerung). Der typische Grauwasseranfall bei einem Bürogebäude mit 500 Arbeitsplätzen entspricht 3.000 L pro Tag, womit eine 4.938 m² große Gründachfläche beim minimalen Regime bzw. 1.235 m² beim maximalen Regime bewässert werden kann.

Die Analysen der Stoffkonzentrationen im Ablauf zeigen, dass die Dachbegrünung – insbesondere bei der Nutzung von filtriertem Grauwasser – selbst Reinigungsfunktionen übernimmt, etwa durch die Reduzierung der CSB-Konzentration (chemischer Sauerstoffbedarf) und des Gesamtstickstoffs (TN), was zu einer Substitution der Reinigungsleistung der Pflanzenkläranlage führt. Die Ablaufkonzentrationen der Grauwasser-bewässerten Flächen waren, in Hinblick auf die untersuchten Stoffe, nicht systematisch höher als die der unbewässerten Flächen. Damit erscheint auch die lokale Versickerung oder Einleitung des Ablaufwassers in die Regenwasserentwässerung möglich und sinnvoll. Formal fällt Grauwasser allerdings derzeit unter die Abwasserbeseitigungspflicht und es bestehen häufig keine etablierten Regelungen für die Genehmigung von lokalem Rückhalt und Wiederverwendung von Grauwasser. Daher ist für die Planung und Umsetzung eine frühzeitige Abstimmung mit dem Abwasserbeseitigungsbetrieb und der Genehmigungsbehörde sinnvoll.

Ein häufig diskutiertes Risiko bei der Bewässerung mit Grauwasser ist die potenzielle Anreicherung von Salzen im Substrat, da erhöhte Salzkonzentrationen zu physiologischem Stress bei Pflanzen führen können. Die Ergebnisse zeigten einen erhöhten Salzexport aus der Dachbegrünung in Folge der Grauwasserbewässerung. Eine Anreicherung der Salze im Substrat konnte nicht festgestellt werden. Die nicht-bewässerten Wintermonate regenerierten die Salzaufnahme, so dass es nicht zu einem fortschreitenden Anstieg der Konzentration im Substrat und Ablaufwasser kam. Im

Untersuchungszeitraum konnten keine eindeutigen salzbedingten Stresssymptome (z. B. Welke, Blattverfärbungen, Wachstumshemmung) an den Pflanzen beobachtet werden. Durch einen systematischen Vergleich der Grauwasser-bewässerten Pflanzungen mit Trinkwasser-bewässerten Referenzfeldern würden sich Auswirkungen durch im Grauwasser enthaltene Stoffe klarer identifizieren lassen.

Zusammengefasst besteht Forschungsbedarf zu folgenden Themen:

- Langfristige Untersuchungen zur Validierung der Auswirkungen einer Bewässerung mit filtriertem Grauwasser auf die untersuchten Pflanzenarten, einschließlich möglicher wachstumsfördernder Effekte durch verbliebene Nährstoffe unter Berücksichtigung pflanzenartspezifischer Reaktionen.
- Ermittlung der minimal erforderlichen Wassermenge zur Aufrechterhaltung der Pflanzenvitalität während sommerlicher Hitzeperioden, durch weitere Reduktion der Bewässerungsmenge des minimalen Regimes.
- Untersuchung der Auswirkungen höher konzentrierten Grauwassers auf die Pflanzenvitalität sowie den Stoffhaushalt vor dem Hintergrund der teils deutlich unter Literaturwerten liegenden gemessenen Grauwasserkonzentrationen an CSB, DOC, TN, TSS und TP.
- Untersuchungen zur Anwendbarkeit marktüblicher Bodenfeuchtesensoren für die sensorgesteuerte Bewässerung von Gründächern.
- Systematischer Vergleich von Grauwasser-bewässerten Pflanzungen mit Trinkwasser-bewässerten Referenzfeldern, um potenzielle Auswirkungen der im Grauwasser enthaltenen Stoffe auf Pflanzen und Substrat eindeutig zu identifizieren.

Zusätzlicher Forschungsbedarf besteht zu folgenden Themen:

- Im Rahmen der bisherigen Untersuchungen wurden vor allem physiko-chemische Parameter, Nährstoffe und organische Stoffe betrachtet. Für eine vollständige Bewertung der Umweltrisiken sollten in weiteren Untersuchungen grauwassertypische Spurenstoffe untersucht werden.
- Gezielte Steuerung lokalklimatischer Effekte mittels an die lokale Wasserbilanz angepasster Substratmischungen unter Einbeziehung regional verfügbarer Böden (Optimierung Stoffkreisläufe, als Klimaanpassungs-strategie für Dachbegrünungen und ggf. zur Reduzierung der Anfälligkeit gegenüber biotischen Stressfaktoren)

9.2 Fazit

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Verwendung von filtriertem, ungeklärtem Grauwasser ohne vorherige Behandlung mittels einer Pflanzenkläranlage grundsätzlich möglich ist und keine offensichtlichen negativen Auswirkungen auf die Vitalität der Vegetation hervorgerufen werden. Die Regenereignisse in 2023 und in der zweiten

Jahreshälfte in 2024 begünstigten eine ähnliche Entwicklung der Vegetation auf den Flächen mit filtrierter und mit geklärter Bewässerung, so dass nur wenige signifikante Unterschiede ausgemacht werden konnten.

Selbst bei minimaler Bewässerung konnten im Vergleich zum unbewässerten Referenzfeld deutliche Effekte auf die Pflanzenvitalität festgestellt werden. Bedingt durch den Zuwachs der angrenzenden Vegetation liegen mittlerweile Teile der Forschungsfelder phasenweise im Schatten. Es ist festzustellen, dass sich die zeitweise Beschattung dieser Felder, insbesondere in den Mittagsstunden in Kombination mit Bewässerung günstig auf den Pflanzenwasserhaushalt und damit wachstumsfördernd auf die Gründachvegetation auswirkt. Da Dachflächen jedoch i. d. R. unverschattet sind, kommt einer an den Wasserbedarf angepassten Bewässerung eine zentrale Bedeutung zu – insbesondere zur Vermeidung von Trockenstress und zur Erhaltung der Vitalität sowie der Blühaktivität. Dabei zeigten die Ergebnisse, dass die Minimalbewässerung (0,6 L/m²/d) bereits ausreicht, um die untersuchten Arten auch während sommerlicher Trockenphasen in einem vitalen Zustand zu halten, während die Vegetation des nicht bewässerten Referenzfeldes in den Sommermonaten deutlich zum Absterben der oberirdischen Pflanzenteile neigt. Eine effiziente Nutzung von Grauwasser zur Bewässerung kann demnach entscheidend zur Vitalitätserhaltung, zur Verbesserung der mikroklimatischen Kühlwirkung am Tage sowie Erhöhung des bauklimatischen Kühlpotenzials im Sommer beitragen.

Die Ergebnisse der Stoffanalysen des Dachablaufwassers zeigen, dass die Dachbegrünung – insbesondere bei Bewässerung mit filtriertem Grauwasser – selbst Reinigungsleistungen übernimmt. Da die Ablaufkonzentrationen der untersuchten Stoffe bei den mit Grauwasser bewässerten Flächen keine systematisch höheren Werte aufwiesen als jene der unbewässerten Referenzflächen, erscheint eine lokale Versickerung oder Einleitung des Ablaufwassers in die Regenwasserentwässerung grundsätzlich möglich und sinnvoll.

Der Verzicht auf eine Pflanzenkläranlage erhöht nicht nur die Übertragbarkeit des Systems auf innerstädtische Flächen mit begrenztem Raumangebot, sondern reduziert zugleich technische Komplexität, Kosten und Wasserverluste durch Verdunstung. Die Ergebnisse der zweijährigen Untersuchung zeigen damit das Potenzial eines ressourcenschonenden und praxistauglichen Ansatzes zur Grauwassernutzung.

Die Ergebnisse unterstreichen zudem, dass die Entscheidung für oder gegen eine Bewässerung eines Gründachs stets in Abhängigkeit der nutzungs- und standortspezifischen Zielsetzungen getroffen werden sollte. Dabei ist die Bewässerung nicht primär Selbstzweck, sondern ein gezielt einsetzbares Instrument zur Erreichung verschiedener Funktionen des Gründachs.

Eine differenzierte Betrachtung verschiedener Nutzungsprofile und Zielsetzungen zeigt, dass Gründächer – unter Berücksichtigung angepasster Bewässerungsstrategien – als

multifunktionale Elemente der Stadtgestaltung genutzt werden können, die je nach Schwerpunktsetzung zur Klimaanpassung, Energieeffizienz, Wasserwiederverwendung und Förderung urbaner Biodiversität beitragen.

10. Literatur

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, *45*(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

DIN (2016): DIN 1986-100 | 2016-12: Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke - Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056.

DWA (2022): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2022). Merkblatt DWA-M 102-4/BWKM 3-4, Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. Teil 4, Wasserhaushaltsbilanz für die Bewirtschaftung des Niederschlagswassers.

Eltner, A., & Sofia, G. (2020). Structure from motion photogrammetric technique. In *Developments in Earth Surface Processes* (Bd. 23, S. 1–24). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1

Grothum, O., Bienert, A., Bluemlein, M., & Eltner, A. (2023). USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES TO FILTER VEGETATION IN COLORIZED SFM POINT CLOUDS OF SOIL SURFACES. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLVIII-1/W2-2023*, 163–170. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W2-2023-163-2023

Hietel, E., Panferov, O., Rößner, U., Seelos, K., Lorenz-Haas, C., & Warnecke, B. (2020). *Semi-intensive Dachbegrünung – Ein innovatives Klimaanpassungs- und Umweltschutzinstrument.* Transforming Cities, (3), 64–71. https://doi.org/10.24053/TC-2020-0063

Hörnschemeyer, B., Henrichs, M., Uhl, M., 2021. SWMM-URBANEVA: A Model for the Evapotranspiration of Urban Vegetation. Water 13, 243. https://doi.org/10.3390/w13020243

Lohaus, I., Meyer, S., Walter, R., Helm, B., Herr, L. E., Freudenberg, P. & Goldberg, V. (2023): 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. https://doi.org/10.25368/2024.2

Lorz, F. (2023): Temperaturverteilung auf einem Gründach mit unterschiedlichem Bewuchs. Bericht Meteorologisches Vertiefungspraktikum TU Dresden, Professur Meteorologie, 20 S. (unveröffentlicht)

Malinowski, R., Heckrath, G., Rybicki, M., & Eltner, A. (2023). Mapping rill soil erosion in agricultural fields with UAV-borne remote sensing data. *Earth Surface Processes and Landforms*, *48*(3), 596–612. https://doi.org/10.1002/esp.5505

Onnen, N., Eltner, A., Heckrath, G., Van Oost, K. (2020): Monitoring soil surface roughness under growing winter wheat with low altitude UAV sensing. Earth Surface Processes and Landforms, 45(14), 3747-3759

Rossman, L.A., (2015): Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1. EPA/600/R-14/413b 353

Schulze, R., Mader, D., und Eltner, A.; 2022. „Genauigkeitspotential direkt georeferenzierter UAS-Messungen am Beispiel eines Bahnhaltepunktes". In *DGPF-Tagungsband*, Band 30, 243–55. http://doi.org/10.24407/KXP:1795622415

Sinsel, T. (2022): Advancements and applications of the microclimate model ENVI-met. Dissertation Universität Mainz, 256 S., http://doi.org/10.25358/openscience-6716.

Umweltbundesamt (2023): Monitoringbericht 2023 zur deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2023

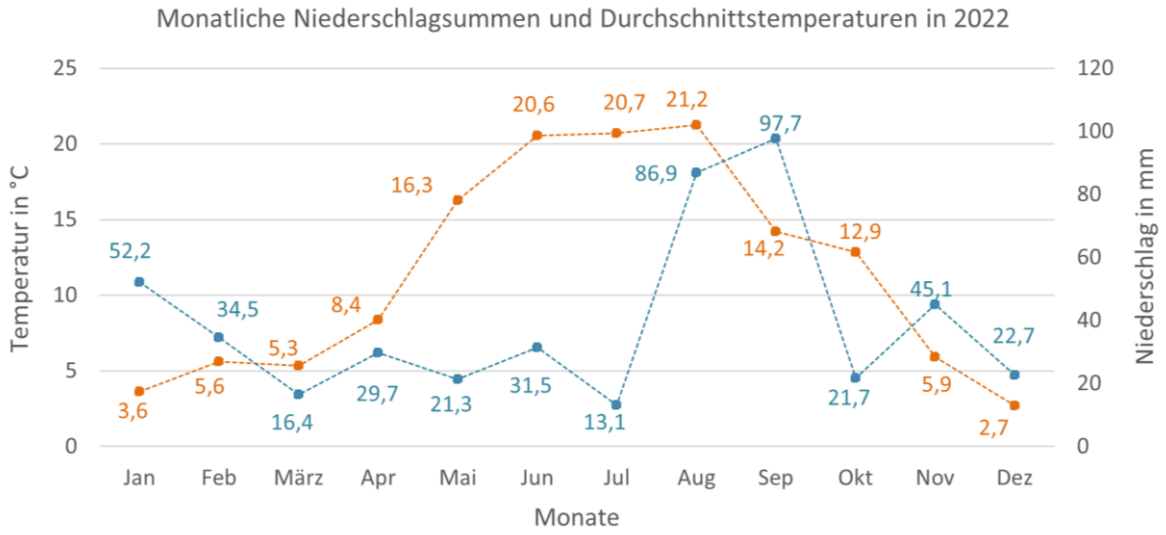
Walker, R., Meinken, E., Schwenk, D., (2016): Optimierung der Evapotranspirations- und Kühlleistung extensiver Dachbegrünungen durch gezielte Nutzung von Grauwasser (Abschlussbericht DBU Projekt AZ 28577-23).

Weinmann, M., Jutzi, B., Mallet, C., & Weinmann, M. (2017). GEOMETRIC FEATURES AND THEIR RELEVANCE FOR 3D POINT CLOUD CLASSIFICATION. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *IV-1/W1*, 157–164. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-1-W1-157-2017

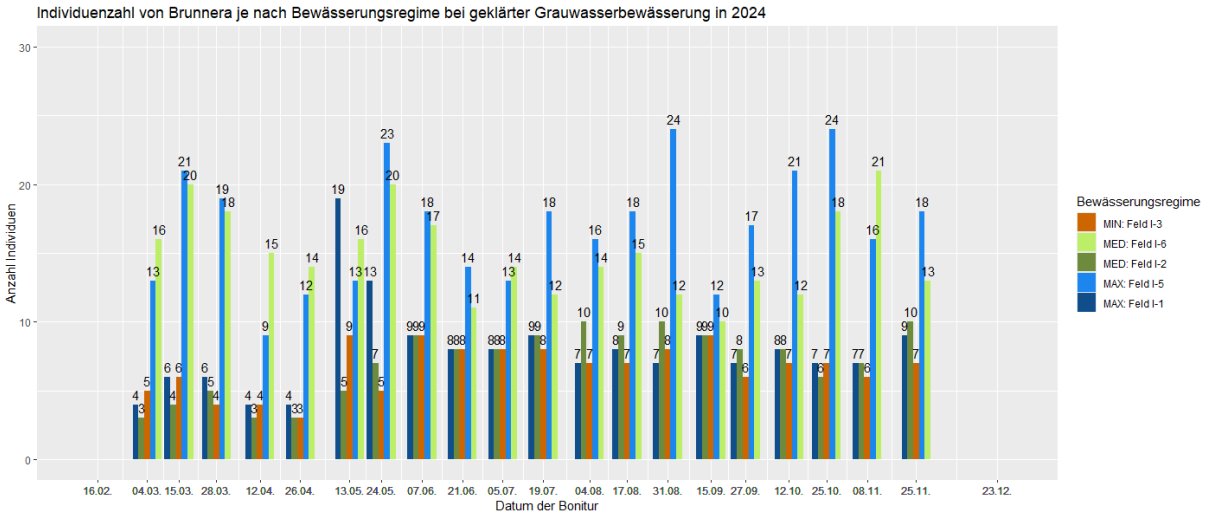
Zehnsdorf, A., Blumberg, M., Müller, R.A., (2019): Helophyte mats (wetland roofs) with high evapotranspiration rates as a tool for decentralised rainwater management – process stability improved by simultaneous greywater treatment. Water Supply 19, 808–814. https://doi.org/10.2166/ws.2018.126

11. Anhang

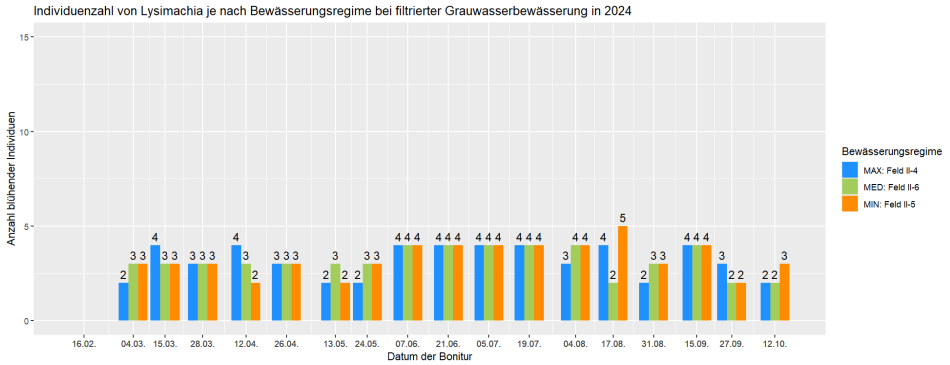
Anhang 1: Klimadiagramm Wetterstation Dresden-Strehlen 2022

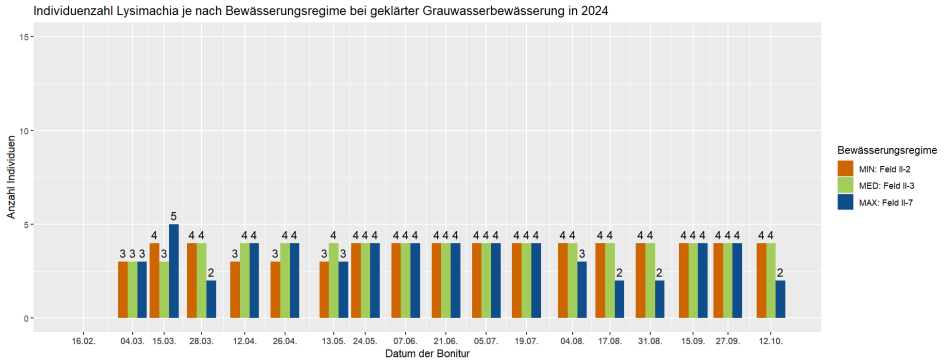


Anhang 2: Individuenzahlen der Brunnera der Gruppe 1 in 2024

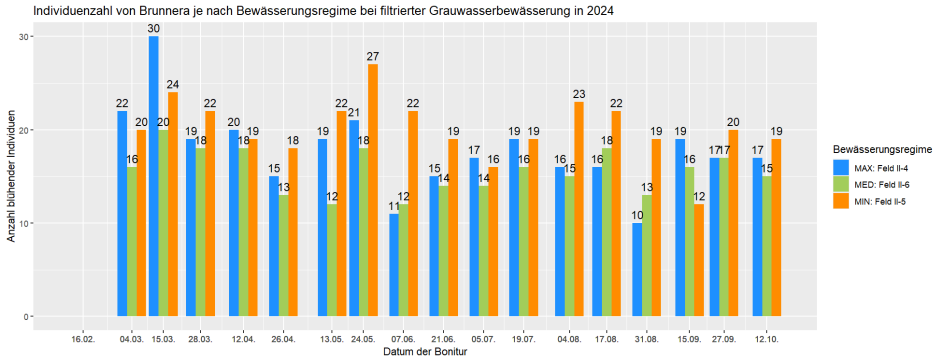


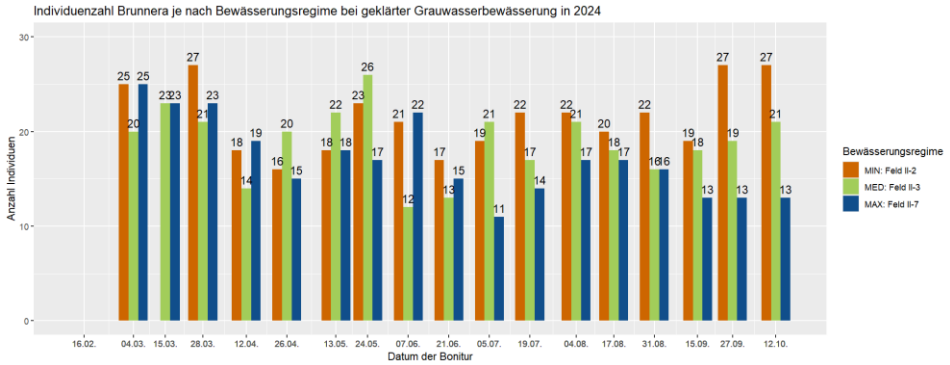
Anhang 3: Individuenzahlen von Lysimachia in 2024 (filtriert/geklärt) der Gruppe 2





Anhang 4: Individuenzahlen von Brunnera in 2024 (filtriert/geklärt) der Gruppe 2





Anhang 5: Blühende Individuen der Gruppe 2 in 2024 – Signifikanztests

Ergebnisse der Signifikanztests blühender Individuen zwischen den Regimen des geklärten und filtrierten Grauwassers sowie innerhalb der geklärten sowie innerhalb der filtrierten Grauwasserbewässerung; signifikantes Ergebnis bei $p < 0,05$

2024	**zwischen geklärt und filtriert**	**innerhalb des geklärten Regimes**	**innerhalb des filtrierten Regimes**
ANOVA-Test	p = 0.995	p = 0.875	p = 0.969
Tukey post-hoc Test	MIN (geklärt-filtriert): p = 0.775 MED (geklärt-filtriert): p = 0.895 MAX (geklärt-filtriert): p = 0.824	MED-MAX: p = 0.968 MIN-MAX: p = 0.960 MIN-MED: p = 0.863	MED-MAX: p = 0.994 MIN-MAX: p = 0.989 MIN-MED: p = 0.966

Anhang 6: Wuchshöhe Gruppe 3 in 2023 und 2024 – Signifikanztests

Ergebnisse der Signifikanztests für die Wuchshöhe der Gruppe 3 zwischen den **filtrierten** Bewässerungsregimen (MIN, MED, MAX) in 2023 und 2024; grün markiert: signifikantes Ergebnis ($p < 0,05$)

	2023	**2024**
Tukey post-hoc Test	MED-MAX: p = 0.958 MIN-MAX: p = 0.871 MIN-MED: p = 0.976	MED-MAX: p = 0.260 MIN-MAX: p = 0.440 MIN-MED: p = 0.086

Ergebnisse der Signifikanztests für die Wuchshöhe der Gruppe 3 zwischen den **geklärten** Bewässerungsregimen (MIN, MED, MAX) in 2023 und 2024; grün markiert: signifikantes Ergebnis ($p < 0,05$)

	2023	**2024**
Tukey post-hoc Test	MED-MAX: p = 0.579 MIN-MAX: p = 0.710 MIN-MED: p = 0.997	MED-MAX: p = 0.903 MIN-MAX: p = 0.959 MIN-MED: p = 0.640

Ergebnisse der Signifikanztests für die Wuchshöhe der Gruppe 3 **zwischen den geklärten und filtrierten** Bewässerungsregimen (MIN, MED, MAX) in 2023 und 2024; grün markiert: signifikantes Ergebnis ($p < 0,05$)

	2023	**2024**
Tukey post-hoc Test	MAX (geklärt-filtriert): p = 0.375 MED (geklärt-filtriert): p = 0.975 MIN (geklärt-filtriert): p = 0.871	MAX (geklärt-filtriert): p = 0.215 MED (geklärt-filtriert): p = 0.718 MIN (geklärt-filtriert): p = 0.694

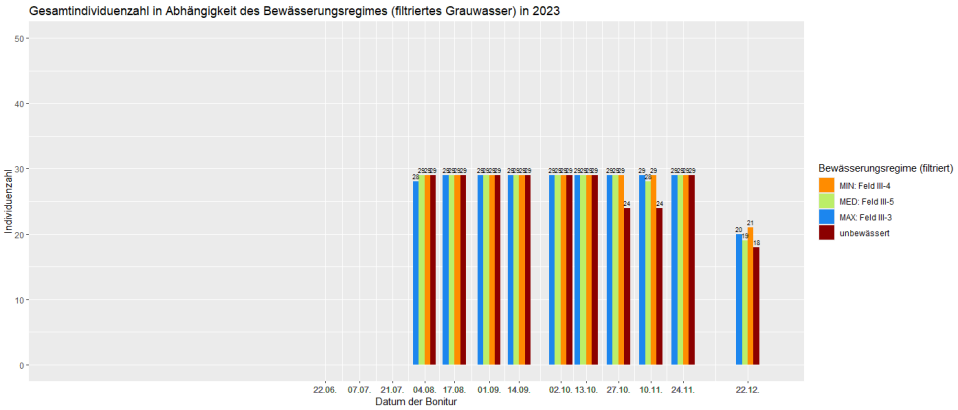
Ergebnisse der Signifikanztests für die Wuchshöhe der Gruppe 3 zwischen den Regimen des **geklärten / filtrierten Grauwassers mit dem unbewässerten Referenzfeld** in 2023; signifikantes Ergebnis bei p < 0,05 (grün markiert)

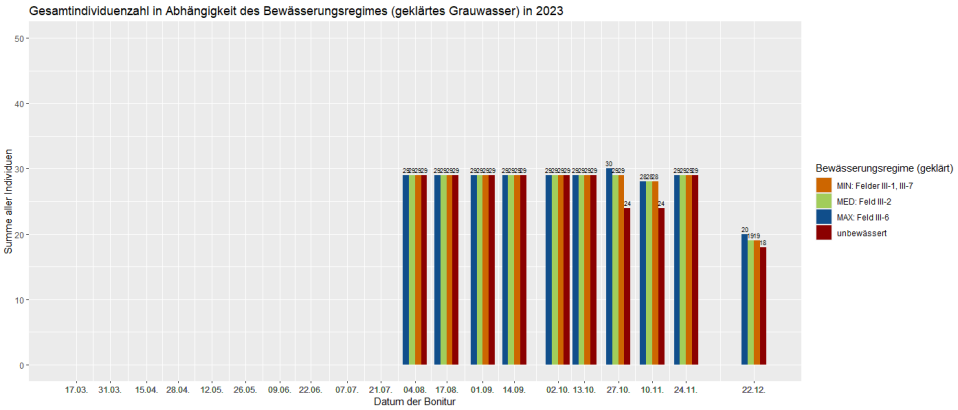
2023	**zwischen unbewässert und filtriertem Grauwasser**	**zwischen unbewässert und geklärtem Grauwasser**
ANOVA-Test	-	-
Tukey post-hoc Test	MIN: p = 0.321 MED: p = 0.238 MAX: p = 0.122	MIN: p = 0.138 MED: p = 0.164 MAX: p = 0.782

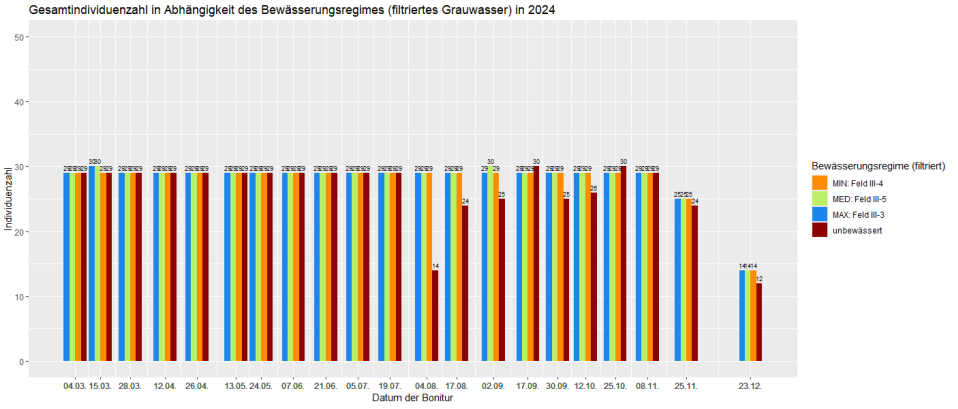
Ergebnisse der Signifikanztests für die Wuchshöhe der Gruppe 3 zwischen den Regimen des **geklärten / filtrierten Grauwassers mit dem unbewässerten Referenzfeld** in 2024; signifikantes Ergebnis bei p < 0,05 (grün markiert)

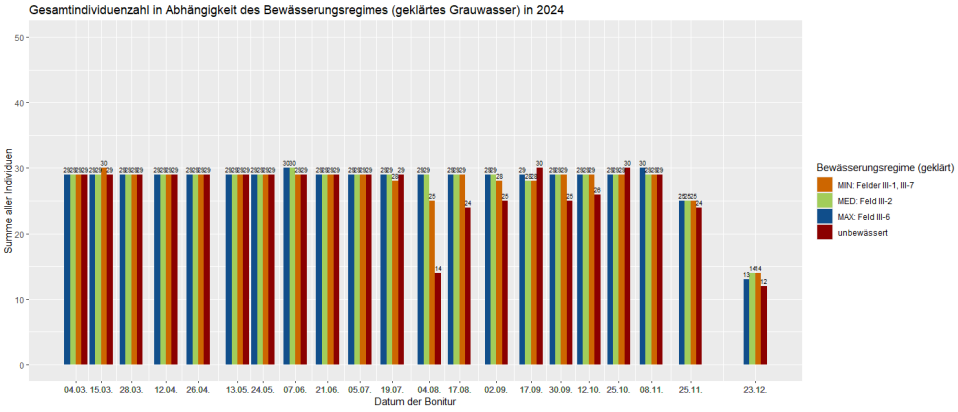
2024	**zwischen unbewässert und filtriertem Grauwasser**	**zwischen unbewässert und geklärtem Grauwasser**
ANOVA-Test	-	-
Tukey post-hoc Test	MIN: p = 0.045 MED: p = 0.184 MAX: p = 0.002	MIN: p = 0.239 MED: p = 0.034 MAX: p = 0.161

Anhang 7: Gesamtindividuenzahlen Gruppe 3 in 2023 und 2024









Anhang 8: Vergleichende Drohnenaufnahmen von MAX (geklärt) der Gruppe 3 2023/2024

Zeitvergleich des sich deutlich schlechter entwickelnden Felds III-6 (maximales Regime, geklärt) bei Neupflanzung (obere Aufnahme vom 24.07.2023), zu Ende der ersten Vegetationsperiode (mittlere Aufnahme vom 04.10.2023) und im voll entwickelten Stadium in 2024 (untere Aufnahme vom 24.06.2024).

Anhang 9: Methodenvergleich Deckungsgraderfassung für die Gruppen 1 bis 3 zu drei verschiedenen Zeitpunkten

Gruppe 1

Fläche	Regime	Datum La-Bau	Prozent LaBau	Datum Geosensor-systeme	Prozent Geosensor-sys-teme	Differenz
FI_1	geklärt (max)	2023-07-17	94.3	2023-07-12	92.9	1.4
FI_2	geklärt (med)	2023-07-17	90.2	2023-07-12	90.9	-0.7
FI_3	geklärt (min)	2023-07-17	85.0	2023-07-12	86.8	-1.8
FI_4	ref	2023-07-17	61.2	2023-07-12	69.8	-8.6
FI_5	geklärt (med)	2023-07-17	90.0	2023-07-12	92.0	-2.0
FI_6	geklärt (min)	2023-07-17	86.7	2023-07-12	90.3	-3.6
FI_1	geklärt (max)	2023-11-14	95.0	2023-11-10	67.9	27.1
FI_2	geklärt (med)	2023-11-14	93.4	2023-11-10	63.7	29.7
FI_3	geklärt (min)	2023-11-14	92.5	2023-11-10	71.8	20.7
FI_4	ref	2023-11-14	70.6	2023-11-10	85.5	-14.9
FI_5	geklärt (med)	2023-11-14	97.7	2023-11-10	95.1	2.6
FI_6	geklärt (min)	2023-11-14	98.0	2023-11-10	94.8	3.2
FI_1	geklärt (max)	2024-06-24	36.4	2024-06-25	35.5	0.9
FI_2	geklärt (med)	2024-06-24	38.9	2024-06-25	40.9	-2.0
FI_3	geklärt (min)	2024-06-24	44.3	2024-06-25	44.2	0.1
FI_4	ref	2024-06-24	32.3	2024-06-25	22.0	10.3
FI_5	geklärt (med)	2024-06-24	98.1	2024-06-25	95.9	2.2
FI_6	geklärt (min)	2024-06-24	99.5	2024-06-25	96.8	2.7

Gruppe 2

Fläche	Regime	Datum La-Bau	Prozent LaBau	Datum Geosensor-systeme	Prozent Geosensor-sys-teme	Differenz
FII_2	geklärt (min)	2023-07-17	81.5	2023-07-12	86.4	-4.9
FII_3	geklärt (med)	2023-07-17	80.4	2023-07-12	78.1	2.3
FII_4	filtriert (max)	2023-07-17	91.7	2023-07-12	91.8	-0.1
FII_5	filtriert (min)	2023-07-17	80.1	2023-07-12	84.0	-3.9
FII_6	filtriert (med)	2023-07-17	84.9	2023-07-12	87.6	-2.7
FII_7	geklärt (max)	2023-07-17	88.4	2023-07-12	89.2	-0.8
FII_2	geklärt (min)	2023-11-14	92.4	2023-11-10	92.4	0.0
FII_3	geklärt (med)	2023-11-14	91.9	2023-11-10	90.1	1.8
FII_4	filtriert (max)	2023-11-14	98.6	2023-11-10	96.6	2.0
FII_5	filtriert (min)	2023-11-14	92.8	2023-11-10	91.1	1.7
FII_6	filtriert (med)	2023-11-14	95.3	2023-11-10	93.3	2.0
FII_7	geklärt (max)	2023-11-14	99.3	2023-11-10	96.8	2.5
FII_2	geklärt (min)	2024-06-24	79.7	2024-06-25	80.2	-0.5
FII_3	geklärt (med)	2024-06-24	80.9	2024-06-25	78.6	2.3
FII_4	filtriert (max)	2024-06-24	88.6	2024-06-25	83.7	4.9
FII_5	filtriert (min)	2024-06-24	72.5	2024-06-25	70.9	1.6
FII_6	filtriert (med)	2024-06-24	86.1	2024-06-25	84.7	1.4
FII_7	geklärt (max)	2024-06-24	90.9	2024-06-25	87.9	3.0

Gruppe 3

Fläche	Regime	Datum La-Bau	Prozent LaBau	Datum Geosensor-systeme	Prozent Geosensor-sys-teme	Differenz
FIII_1	geklärt (min)	2023-07-17	14.6	2023-07-12	8.8	5.8
FIII_2	geklärt (med)	2023-07-17	12.4	2023-07-12	8.2	4.2
FIII_3	filtriert (max)	2023-07-17	12.8	2023-07-12	9.8	3.0
FIII_4	filtriert (min)	2023-07-17	9.7	2023-07-12	7.1	2.6
FIII_5	filtriert (med)	2023-07-17	12.6	2023-07-12	7.4	5.2
FIII_6	geklärt (max)	2023-07-17	10.3	2023-07-12	9.1	1.2
FIII_7	geklärt (min)	2023-07-17	13.1	2023-07-12	7.8	5.3
FIII_8	ref	2023-07-17	12.2	2023-07-12	4.2	8.0
FIII_1	geklärt (min)	2023-11-14	47.9	2023-11-10	42.5	5.4
FIII_2	geklärt (med)	2023-11-14	55.0	2023-11-10	52.2	2.8
FIII_3	filtriert (max)	2023-11-14	56.7	2023-11-10	53.0	3.7
FIII_4	filtriert (min)	2023-11-14	42.0	2023-11-10	36.8	5.2
FIII_5	filtriert (med)	2023-11-14	56.3	2023-11-10	47.0	9.3
FIII_6	geklärt (max)	2023-11-14	54.1	2023-11-10	51.2	2.9
FIII_7	geklärt (min)	2023-11-14	55.5	2023-11-10	47.5	8.0
FIII_8	ref	2023-11-14	33.2	2023-11-10	24.1	9.1
FIII_1	geklärt (min)	2024-06-24	78.0	2024-06-25	75.8	2.2
FIII_2	geklärt (med)	2024-06-24	89.8	2024-06-25	86.7	3.1
FIII_3	filtriert (max)	2024-06-24	86.4	2024-06-25	77.8	8.6
FIII_4	filtriert (min)	2024-06-24	77.6	2024-06-25	72.2	5.4
FIII_5	filtriert (med)	2024-06-24	71.8	2024-06-25	64.5	7.3
FIII_6	geklärt (max)	2024-06-24	78.5	2024-06-25	67.3	11.2
FIII_7	geklärt (min)	2024-06-24	64.4	2024-06-25	58.3	6.1
FIII_8	ref	2024-06-24	61.6	2024-06-25	51.3	10.3