

DIPLOMARBEIT

BAUPHYSIKALISCHE MESSDATENANALYSE

Für Gründach-Testfelder auf dem Gelände
des Botanischen Gartens in Dresden

Name und Vorname des Verfassers:	Philipp Hänicke
Geburtsdatum und Geburtsort:	05.08.1997, Dresden
Institut:	Institut für Bauklimatik
Hochschullehrer/-in:	Dr.-Ing. P. Freudenberg
Betreuer/-in:	Dr.-Ing. P. Freudenberg Dipl.-Ing. H. Fechner Dipl.-Ing. H. Petzold
Termin der Abgabe:	03.08.2022

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Formelverzeichnis.....	VIII
Diagrammverzeichnis.....	IX
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	X
1 Einleitung	11
1.1 Aufgabe & Zielstellung	12
2 Theoretische Grundlagen.....	13
2.1 Gründächer	13
2.1.1 Rechtliche Grundlagen und Planungsleitfäden.....	13
2.1.2 Gründachaufbau.....	14
2.1.3 Baukonstruktive Grundlagen	16
2.1.4 Begrünungsarten	18
2.1.5 Wasserhaushalt.....	21
2.2 Klimatischer Nutzen.....	22
2.2.1 Städtisches Mikroklima	23
2.2.2 Regenwasserrückhaltung.....	26
2.2.3 Schallschutz.....	26
2.2.4 Biodiversität	27
2.2.5 Sommerlicher Wärmeschutz & Energieeinsparung	28
2.3 Kostenaufwand.....	29
2.3.1 Investitionskennwerte	29
2.3.2 Fördermöglichkeiten.....	30
2.3.3 Unterhaltungskosten.....	31
3 Gründach-Projekt	32
3.1 Projektbeschreibung.....	32
3.1.1 Beteiligte Institute.....	34
3.1.2 Projektstand & bisherige Erkenntnisse	36
3.2 Projektstandort	37
3.2.1 Lage in der Stadt.....	37
3.2.2 Klimadaten	38

3.3	Konstruktiver Aufbau.....	39
3.3.1	Dachaufbauten.....	39
3.3.2	Feldaufbauten	40
3.4	Be- & Entwässerung.....	42
3.4.1	Pflanzenkläranlage.....	43
3.4.2	Dachbewässerung	45
3.4.3	Kostenaufwand.....	46
3.4.4	Dachentwässerung.....	47
3.5	Methodik	48
3.5.1	Zielstellung.....	48
3.5.2	Bepflanzung & Besonnung	49
3.5.3	Bewässerungsintervalle.....	53
3.5.4	Feldübersicht.....	54
3.5.5	Fotodokumentation.....	57
3.6	Sensorik.....	67
3.6.1	Feldsensoren	68
3.6.2	Wetterstation.....	73
3.6.3	Messsensorenübersicht.....	75
3.7	Software	76
3.7.1	Web-Applikation.....	76
3.7.2	Microsoft Office Excel.....	77
3.7.3	Skript-basierte Auswertung.....	77
3.8	Berechnungen	78
3.8.1	Feuchtebilanzierung.....	78
3.8.2	Bilanzierungsfunktionen.....	79
4	Messdatenanalyse	80
4.1	Messperiode	80
4.2	Logbuch-Einträge.....	81
4.3	Klimadaten: Niederschlag.....	82
4.3.1	Wetterstation Dresden-Klotzsche	83
4.3.2	Wetterstation an den Forschungsfeldern.....	84
4.3.3	Wetterstation im Botanischen Garten.....	87
4.4	Bewässerung	89
4.5	Sensordaten.....	92

4.5.1	Dachabfluss	92
4.5.2	Wägung.....	102
4.5.3	Bodenfeuchte.....	103
4.5.4	Vertikales Temperaturprofil	112
5	Messdatenauswertung.....	113
5.1	Phänotypische Betrachtung	113
5.2	Temperaturprofil.....	117
5.3	Feuchtebilanzierung	121
5.4	Zusammenhänge mit Bewässerung und Standortfaktoren	127
6	Fazit	128
6.1	Fehlerhafte Messdaten.....	128
6.2	Zusammenhänge mit klimatischen Randbedingungen.....	129
6.2.1	Verdunstung nach Einstrahlung	129
6.2.2	Verdunstung nach Bewässerungsvolumen (quantitativ).....	130
6.3	Empfehlungen für Bau & Bewässerung von Gründächern	130
6.4	Ausblick	131
7	Literaturverzeichnis	132

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Drohnenaufnahme Forschungsfelder	12
Abbildung 2 Optigrün Retentionsdach, Schematischer Dachaufbau	15
Abbildung 3 Extensiv begrüntes Dach Wasser	18
Abbildung 4 Intensiv begrüntes Dach Wasser	19
Abbildung 5 Einfach intensiv begrüntes Dach	20
Abbildung 6 Forschungsfelder im Botanischen Garten Dresden.....	32
Abbildung 7 Stadtplan Dresden-Zentrum mit Botanischem Gartens	37
Abbildung 8 Wetterstation des Botanischen Gartens Dresden	38
Abbildung 9 Wetterstation für Testfelder an der Pflanzenkläranlage	38
Abbildung 10 Schematischer Dachaufbau, maßstäblich	39
Abbildung 11 Felder FI.1 bis FI.3 mit Lysimeter und CTD-Sonden	41
Abbildung 12 Lageplan, maßstäblich.....	42
Abbildung 13 Schema Pflanzenkläranlage M 1:50	43
Abbildung 14 Pflanzenkläranlage mit Wetterstation.....	44
Abbildung 15 Bewässerungssystem BoGa	45
Abbildung 16 Gegenüberstellung Naturdach und Forschungsprojekt.....	46
Abbildung 17 Dachentwässerung mit CTD-Sonden, M 1:20	47
Abbildung 18 3D-Aufsicht mit Verschattung am 30.06. & 30.03. mittags.....	49
Abbildung 19 Detailgrundriss Testfelder mit Sensorik und Bepflanzung, M 1:25.....	50
Abbildung 20 Dachlageplan M1:100 mit einzelnen Testfeldern.....	55
Abbildung 21 Übersichtsplan M1:100 Grauwasser-Aufbereitungsanlage.....	56
Abbildung 22 Feld FI.1, Stand Juni 2022	57
Abbildung 23 Feld FI.2, Stand Juni 2022	57
Abbildung 24 Feld FI.3, Stand Juni 2022	58
Abbildung 25 Feld FI.4, Stand Juni 2022	58
Abbildung 26 Feld FI.5, Stand Juni 2022	59
Abbildung 27 Feld FI.6, Stand Juni 2022	59
Abbildung 28 Feld FII.1, Stand Juni 2022.....	60

Abbildung 29 Feld FII.2, Stand Juni 2022.....	60
Abbildung 30 Feld FII.3, Stand Juni 2022.....	60
Abbildung 31 Feld FII.4, Stand Juni 2022.....	61
Abbildung 32 Feld FII.5, Stand Juni 2022.....	61
Abbildung 33 Feld FII.6, Stand Juni 2022.....	61
Abbildung 34 Feld FII.7, Stand Juni 2022.....	62
Abbildung 35 Feld FIII.1, Stand Juni 2022	62
Abbildung 36 Feld FIII.2, Stand Juni 2022	63
Abbildung 37 Feld FIII.3, Stand Juni 2022	63
Abbildung 38 Feld FIII.4, Stand Juni 2022	64
Abbildung 39 Feld FIII.5, Stand Juni 2022	64
Abbildung 40 Feld FIII.6, Stand Juni 2022	65
Abbildung 41 Feld FIII.7, Stand Juni 2022	65
Abbildung 42 Feld FIII.8, Stand Juni 2022	66
Abbildung 43 Messstrecken-Schema.....	67
Abbildung 44 Kombinationssonde hydra probe von Stevens Water Monitoring Systems.....	68
Abbildung 45 Temperaturlanze 10T der UIT Dresden GmbH.....	68
Abbildung 46 ISA-UV/VIS von Go Systemelektronik	69
Abbildung 47 Wärmeflussplatte GFP01 von Hukseflux	70
Abbildung 48 CTD-40mm der UIT Dresden GmbH.....	71
Abbildung 49 Wärmebildkamera VarioCAM HD research 980S von InfraTec	72
Abbildung 50 GallTEC KPC 1/6-ME.....	73
Abbildung 51 Niederschlagssensor Young 52202 ME	73
Abbildung 52 Thies Windgeber compact	74
Abbildung 53 Thies Windrichtungsgeber compact.....	74
Abbildung 54 Net-Radiometer Hukseflux NR01.....	74
Abbildung 55 Grafen in der Web-Oberfläche von Grafana	76
Abbildung 56 Schema CTD-Sensor	92
Abbildung 57 Ursache der lokalen Feuchteabweichungen.....	104

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Vergleich der Begrünungsarten.....	18
Tabelle 2 Überschlägige Kennwerte Verdunstung.....	24
Tabelle 3 Kenndaten Feldaufbau.....	41
Tabelle 4 Herstellerangaben Vorlaufspeicher & Ablaufspeicher	43
Tabelle 5 Herstellerangaben Bepflanzter Bodenfilter	44
Tabelle 6 Herstellerangaben Bewässerungssystem	45
Tabelle 7 Pflanzeigenschaften	51
Tabelle 8 Pflanzenbestand je Feld	52
Tabelle 9 Bewässerungsplan mit zeitlichem Versatz	53
Tabelle 10 Feldübersicht.....	54
Tabelle 11 Herstellerangaben Kombinationssonden.....	68
Tabelle 12 Herstellerangaben Vertikale Temperaturprofilsonden.....	68
Tabelle 13 Herstellerdaten Absorptionsspektrometersonde.....	69
Tabelle 14 Herstellerangaben Lysimeter	69
Tabelle 15 Herstellerangaben LF-/Temp.-Sensor Bauteile außen & innen.....	70
Tabelle 16 Herstellerangaben Wärmeflussplatten.....	70
Tabelle 17 Herstellerdaten CTD-Sonden.....	71
Tabelle 18 Herstellerangaben Infrarotkamera.....	72
Tabelle 19 Herstellerangaben LF/Temp.-Sensor & Luftdrucksensor Wetterstation.....	73
Tabelle 20 Herstellerangaben Niederschlagsmesser	73
Tabelle 21 Herstellerangaben Windgeschwindigkeitssensor & Windrichtungsgeber.....	74
Tabelle 22 Herstellerangaben Net-Radiometer	74
Tabelle 23 Messsensorenübersicht	75
Tabelle 24 Auszug aus den Logbucheinträgen 2021, gefiltert	81
Tabelle 25 Statistische Kennwerte der Niederschlagsmesser Juni & Juli 2021	82
Tabelle 26 Errechner Bewässerungsplan	90
Tabelle 27 Parameter für die Dachabflussberechnung	93
Tabelle 28 Statistische Kennwerte Dachabfluss	94

Tabelle 29 Errechneter Dachabfluss mit und ohne Messwertfilterung	97
Tabelle 30 Vergleich errechneter Dachabflüsse	100
Tabelle 31 Statistische Kennwerte Bodenfeuchte.....	103
Tabelle 32 Fehlertabelle ohne Wasserzufuhr.....	105
Tabelle 33 Bodenfeuchte nach Bodenzusammensetzung	106
Tabelle 34 Fehlwerte bei der Verdunstung nach Ermittlungsart der Bodenfeuchte	111
Tabelle 35 Statistische Kennwerte aller Temperaturlanzen, Pos. 1 & 10.....	112
Tabelle 36 Statistische Kennwerte Temperaturlanzen 1 & 2.....	112
Tabelle 37 Standardabweichungen der obersten und untersten Position der VTP.....	119
Tabelle 38 Summe der Evaoptranspirationsmassen Felder FI.1 bis FI.3 (Lysimeter).....	122
Tabelle 39 Summe der Evaoptranspirationsmassen Feldgruppe I.....	124
Tabelle 40 Summe der Evaoptranspirationsmassen Feldgruppe II	124
Tabelle 41 Summe der Evaoptranspirationsmassen Feldgruppe III.....	126
Tabelle 42 Übersicht über abgeschätzte Evapotranspirationsmassen	127

FORMELVERZEICHNIS

Formel 1 Feuchtebilanz	78
Formel 2 Ermittlung Evapotranspiration aus Feuchtbilanz.....	78
Formel 3 Summengleichung Niederschlag	85
Formel 4 Volumenänderung im Sammelbehälter	92
Formel 5 Volumenbilanz Sammelbehälter	92
Formel 6 Schlitzwehrformel nach Poleni und rückgestauter Seitenabfluss nach Bollrich	93
Formel 7 Volumenbilanz nach Dachabfluss umgestellt	93
Formel 8 Kombinierte Dachabflussformel.....	93
Formel 9 Umgestellte Volumenbilanz des Sammelbehälters.....	95
Formel 10 Umrechnung Lysimeter-Runoff	100
Formel 11 Evapotranspiration ohne Wassereintrag.....	105
Formel 12 Kurvenstauchung in Zielwertbereich	106
Formel 13 Kalibrierungsfunktion nach Steven Water Monitoring Systems	107
Formel 14 Kalibrierungsfunktion nach Steven Water Monitoring Systems	107
Formel 15 Umgestellte Kalibrierungsfunktion	107
Formel 16 Kalibrierungsfunktion mit alten und neuen Parametern.....	107
Formel 17 Funktion umgestellt nach neuer Bodenfeuchte.....	107
Formel 18 Bodenfeuchteermittlung aus Volumenanteilen.....	110

DIAGRAMMVERZEICHNIS

Diagramm 1 Klimadiagramm Wetterstation Dresden-Klotzsche	83
Diagramm 2 Niederschlagswerte an den Forschungsfeldern und in Dresden-Klotzsche	84
Diagramm 3 Niederschlagssummen nach Summenangleichung	85
Diagramm 4 Vergleichsdiagramm Niederschläge Dresden-Klotzsche.....	86
Diagramm 5 Niederschlagswerte an den Forschungsfeldern und im Botanischen Garten	87
Diagramm 6 Vergleichsdiagramm Niederschläge Botanischer Garten.....	88
Diagramm 7 Falsch-positive und falsch-negative Messwerte	96
Diagramm 8 Korrigierter Dachabfluss Felder FI.1 bis FI.3.....	99
Diagramm 9 Vergleich CTD-Dachabfluss und Lysimeter-Runoff.....	101
Diagramm 10 Gewicht Feld FI.1 im Jahresverlauf	102
Diagramm 11 Verdunstung Felder FI.1 bis FI.3 mittels Bodenfeuchte- & CTD-Sensoren.....	110
Diagramm 12 Verdunstung Felder FI.1 bis FI.3 mittels Lysimeterdaten	111
Diagramm 13 Temperaturlanze 1, Pos. 1 (unten) bis 10 (oben).....	118
Diagramm 14 Temperaturlanze 2, Pos. 1 (unten) bis 10 (oben).....	118
Diagramm 15 Temperaturlanzen, Pos. 10 (oben)	119
Diagramm 16 Temperaturlanzen, Pos. 1 (unten).....	120
Diagramm 17 Feuchtebilanz Feld FI.1 (mit Lysimeterdaten) VTP.....	121
Diagramm 18 Evapotranspirationsmasse Felder FI.1 bis FI.3 (Lysimeterdaten)	122
Diagramm 19 Evapotranspiration (qualitativ) FI (sonnig).....	123
Diagramm 20 Evapotranspiration (qualitativ) FII (halbschattig).....	125
Diagramm 21 Evapotranspiration (qualitativ) FIII (schattig)	126

ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS

Allgemein

DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
FLL	Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau

Sensoren

ASM	Absorptionsspektrometersonde
CTD	CTD-Sonde (Wasserhaushalt: Dachabfluss, elektrische Leitfähigkeit, Wassertemperatur)
IRK	Infrarotkamera
LDW	Luftdrucksensor Wetterstation
LTA	Luftfeucht- & Temperatursonde außen
LTI	Luftfeucht- & Temperatursonde innen
LTW	Luftfeucht- & Temperatursensor Wetterstation
LYS	Lysimeter (Masse)
NRM	4-Komponenten Net-Radiometer
NSW	Niederschlagssensor Wetterstation
VTP	Vertikales Temperaturprofil
WFP	Wärmeflussplatten
WGW	Windgeschwindigkeitssensor Wetterstation
WLT	Kombinationssonde: Wassergehalt, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur
WRW	Windrichtungsgeber Wetterstation

Pflanzen

ALT	Altai-Bergenie (<i>Bergenia cordifolia</i>)
GIL	Gilbweiderich (<i>Lysimachia punctata</i>)
KAU	Kaukasus-Vergissmeinnicht (<i>Brunnera macrophylla</i>)
KER	Kerzen-Knöterich (<i>Polygonum amplexicaule</i>)
PRA	Pracht-Storchschnabel (<i>Geranium x magnificum</i> 'Rosemoore')
PUR	Purpurglöckchen (<i>Heuchera villosa</i> var. <i>Macrorrhiza</i>)
TEL	Telekie (<i>Telekia speciosa</i>)
VOR	Vorsommer-Phlox (<i>Phlox idahonis</i>)
WAC	Wachsglocke (<i>Kirengeshoma palmata</i>)

1 EINLEITUNG

In den heutigen Stadträumen findet sich aufgrund der baulichen Dichte ein sehr hoher Versiegelungsgrad, der zu zunehmenden klimatischen Problemen führt. Um diesen Auswirkungen entgegenzuwirken, stellen Gründächer eine sehr effiziente Variante dar: Der positive Effekt zeigt sich nicht nur in ausgeglicheneren Temperaturen rund um die Dachhaut und damit besserem Mikroklima und Feuchtegehalt, sondern ebenfalls durch Verbesserungen im Schallschutz, der Dämmung und des Schutzes der Dachkonstruktion.

Dabei gibt es eine Vielzahl verschiedener Konstruktionsarten für Gründächer: Von der extensiven Dachbegrünung mit kleinen, robusten und pflegeleichten Pflanzen bis hin zur Intensiven Dachbegrünung mit großer Pflanzenvielfalt ähnlich einem Garten. Als Zwischenvariante dient die einfache Intensivbegrünung, welche auf widerstandsfähige Pflanzen setzt, aber in Trockenphasen bewässert wird.

Im Rahmen eines Kooperations-Forschungsprojektes verschiedener Institute der Technischen Universität Dresden und mehrerer Praxispartner wurde diese Art der Einfachen Intensivbegrünung in Testfeldern auf dem Gelände des Botanischen Gartens in Dresden umgesetzt. In diesen Testfeldern können mittels verschiedener Sensoren das Wasserspeicherverhalten, die thermischen Effekte, sowie die Verdunstungskapazität der verschiedenen Testfelder im Verlauf mehrerer Jahre erfasst werden. Ziel soll es sein, für die einzelnen Testfelder die optimale Bewässerung zur Verbesserung des Mikroklimas zu ermitteln, um so allgemeingültige Aussagen für die Bewässerung treffen zu können und dies zukünftig mittels Simulationsprogramm für verschiedenste Arten von Gründächern mit Einfacher Intensivbegrünung modellieren zu können.

1.1 AUFGABE & ZIELSTELLUNG

Zu Beginn „soll in einem ersten Schritt eine Bestandserfassung der Prüfflächen und aller bauklimatisch relevanten Sensorik (Lage, Messgröße, Messgenauigkeit, Kalibriererfordernisse) gemacht und veranschaulicht werden. Für diese Sensoren ist zusammenzufassen, welche Zeiträume von Messdaten vorhanden sind und welche davon für eine Auswertung geeignet erscheinen. Hierfür müssen Messdatenkennwerte (statistische Kennwerte: Min, Max, Summen, Häufigkeitsverteilungskennwerte etc.) aufgezeichnet und Messdatenausfälle quantifiziert werden. Aus dieser Bestandserfassung ergeben sich Vegetations-Zeiträume, welche für eine Auswertung geeignet sind. Diese sind einer detaillierteren Betrachtung zu unterziehen, in welcher einige der Kernfragen im Forschungsprojekt adressiert werden. Zu diesen gehören die Auswertung der Oberflächentemperaturen und Substratfeuchtegehalte, des Ablaufs im Jahresverlauf (Abhängigkeit von Einstrahlung, Niederschlägen etc.) und die Ermittlung der Verdunstungskapazität der Gründachflächen im Vergleich unterschiedlicher Bewässerungsabstände und ggf. unterschiedlicher Besonnungsphasen. Die Erkenntnisse aus diesen Datenauswertungen sind zusammenzufassen und in Empfehlungen für den Betrieb solcher einfachen intensiven Dachbegrünungen zu überführen.“ (Aufgabenstellung des IBK, 2022)



Abbildung 1 Drohnenaufnahme Forschungsfelder
Quelle: Modellprojekt Integrales Wassermanagement

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1 GRÜNDÄCHER

Dachbegrünungen sind schon lange ein Bestandteil architektonischer Bauten. Schon in der Antike finden sich Beschreibungen, die von mit Pflanzen begrünten Dächern sprechen. Je nach Epoche folgen die Dachbegrünungen unterschiedlichen Gestaltungen. (vgl. Ahrendt 2007, 7ff.) Zur heutigen Zeit hat sich allerdings ihr Nutzen gewandelt: Statt nur einem rein optischen Aspekt zu dienen sind Gründächer heute ein Teil des Mikroklimas des Gebäudes und tragen maßgebend zum ökologischen Bauen bei.

2.1.1 Rechtliche Grundlagen und Planungsleitfäden

Die Dachbegrünung wird hierzulande wie alle Bauteile über DIN-Normen geregelt, welche neben der Konstruktion und der Entwässerung auch den Naturschutz und Brandschutz betrachten. Besonders relevant sind dafür folgende Normen:

- DIN 1055 Einwirkungen auf Tragwerke
- DIN 4102 Brandverhalten von Baustoffen und Bauprodukten
- DIN 18195 Bauwerksabdichtungen
- DIN 18531 Abdichtung von Dächern
- DIN 18915 bis 18920 Vegetationstechnik im Landschaftsbau

Zudem wird auf Gründächer noch in weiteren Gesetzen und Richtlinien eingegangen, die bei der Bauausführung zu beachten sind.

- Landesbauordnung / Musterbauordnung (LBO / MBO):
Dachkonstruktion, Brandschutz
- FLL-Dachbegrünungsrichtlinien
- Flachdachrichtlinien
- Denkmalschutzgesetze

2.1.2 Gründachaufbau

Gründächer können je nach zugrundeliegendem Bautyp verschiedene Bauformen aufweisen. Oft findet man Gründächer auf Flachdächern bis zu einer Neigung von 15° , wengleich diese auch auf Steildächern mit einer Neigung bis zu 45° mittels zusätzlicher Schubsicherung möglich sind. (vgl. Optigrün International AG 2022, 22f.) Trotz der unterschiedlichen Bauwerkskonstruktionen ähnelt sich der Schichtaufbau zumeist. Unter dem Gründach selbst findet sich zunächst immer die tragende Schicht des Gebäudes, was z.B. bei Flachdächern oft eine Stahlbetondecke oder eine vergleichbare Konstruktion ist.

Über der Konstruktionsebene wird zunächst eine Schutzschicht verlegt. Diese besteht aus zwei Teilen: Einer wurzelfesten Abdichtung und einer Schutzlage. Erstere verhindert eine Durchdringung der Wurzeln in Richtung der tragenden Dachkonstruktion und kann somit eine Beschädigung selbiger verhindern. Die Schutzlage ist als redundante Schicht anzusehen und verstärkt damit die abdichtende Wirkung zusätzlich.

Darüber wird meist eine Trennlage aufgebracht, welche den oberhalb befindlichen Gründachaufbau vor möglichen chemischen Absonderungen der meist aus Kunststoff bestehenden Schutzschicht schützen kann.

Die darauffolgende Drainschicht dient zur Wasserregulierung des Gründachs. Sie leitet Wasser, das das Substrat nicht mehr aufnehmen kann, zu einem Dachablauf. Gleichzeitig kann in der Drainage auch Wasser gespeichert werden, sodass diese als zusätzlicher Wasserspeicher dient. Damit wird verhindert, dass sich das Wasser im Substrat staut und folglich werden Stauwasserschäden und daraus resultierende Überwässerung der Vegetation vermieden.

Gegebenenfalls wird eine weitere Filterschicht in Form eines Filtervlieses auf die Drainage aufgebracht. Dadurch wird das Eindringen von Kleinstteilen aus dem Substrat in die Drainage und eine dadurch verursachte Verstopfung von Drainage und Dachabfluss verhindert. Gleichzeitig darf diese aber nicht vollständig abdichten, um eine Durchwurzelung hin zur Drainage zu ermöglichen und so eine Wasseraufnahme aus der Drainage in die Wurzeln zu gewährleisten.

Darüber folgt eine Substratschicht. Sie ist eine Nachbildung eines natürlichen Oberbodens und bietet der Vegetation eine optimale Grundlage für das Wachstum. Es handelt sich dabei um Gemische verschiedener Stoffe, die den Pflanzen vor allem lebenswichtige Nährstoffe zur Verfügung stellen. Durch ihre bodenähnliche Dichte geben diese den Pflanzen auch ausreichend Halt, um der Witterung standzuhalten. Gleichzeitig kann in der Substratschicht das Wasser versickern, welches dann von den Pflanzen wieder aufgenommen werden kann. Neben der Wasserspeicherfunktion hat die Substratschicht eine wasserregulierende Funktion, d.h. überschüssiges Wasser kann in die Drainschicht abgegeben werden, welches dort gespeichert und gegebenenfalls abgeführt wird. Dafür muss eine entsprechend hohe Porosität des Materials vorhanden sein. Im Gegensatz zu natürlichem Oberboden ist das Eigengewicht sehr gering zu halten, um die Flächenlast (statische Belastung) der Konstruktion so gering wie nötig zu halten.

Generell kann für alle Schichten eine Vielzahl von Materialien verwendet werden. Meist bieten Hersteller von Gründächern auch fertige Komplettlösungen für verschiedene Dach- und Gründacharten an. Eine entsprechende Auswahl der Materialien erfolgt entsprechend dem Standort und der gewünschten Vegetation, sowie weiterer projektspezifischer Einflüsse, wie z.B. der Statik des Daches. (vgl. Kolb 2016, 38ff.)

Die gesetzlichen Mindestanforderungen bezüglich physikalischer Kennwerte der einzelnen Schichten sind in den Dachbegrünungsrichtlinien der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau festgeschrieben. (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau und Lösken 2018)

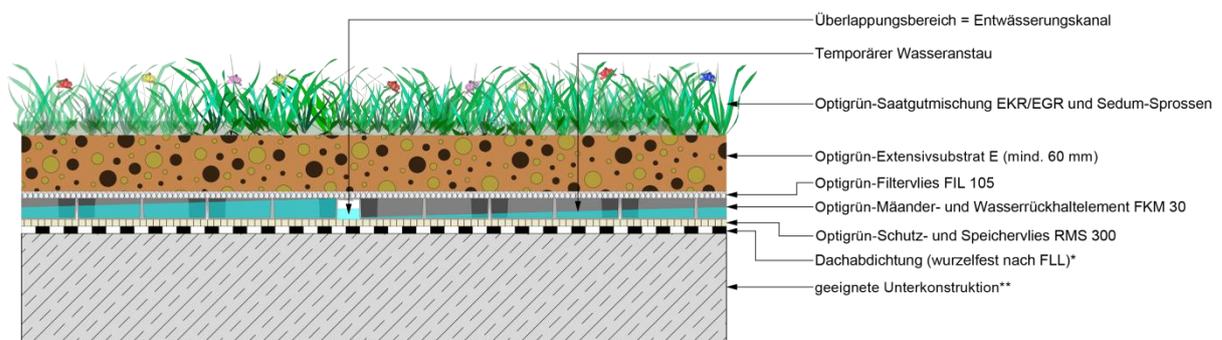


Abbildung 2 Optigrün Retentionsdach, Schematischer Dachaufbau

Quelle: <https://www.optigruen.de/systemloesungen/retentionsdach/maeander-30/>, abgerufen am 08.05.2022

2.1.3 Baukonstruktive Grundlagen

In der baukonstruktiven Umsetzung von Gründächern sind neben statischen Bedingungen auch funktionale Anforderungen zu beachten. Um die vollständige Funktionsfähigkeit der Konstruktion unter dem Gründach zu gewährleisten, müssen zusätzliche Maßnahmen getroffen werden. Diese betreffen sowohl die Tragfähigkeit des Daches aufgrund zusätzlicher Belastung, als auch die zusätzliche Abdichtung aufgrund von zusätzlichem Wasser auf dem Dach. Dabei spielt besonders das passive Kühlvermögen von Gründächern durch Verdunstung von Wasser und der damit verbundenen Verdunstungskühlung über die Blattoberflächen, die sog. Evapotranspiration, eine besondere Rolle.

Tragfähigkeit

Grundsätzlich müssen alle Gründächer in Kombination mit der darunter befindlichen Dachkonstruktion den Mindestanforderungen der Baustatik genügen. Dafür ist es relevant, die statische und die variable Last von Gründächern in Kenntnis zu bringen.

Die statischen Lasten sind vollständig abhängig von dem Schichtaufbau des Gründaches und variieren dementsprechend. Für jede Schicht kann separat die statische Last ermittelt werden. Alle Angaben dazu finden sich bei den entsprechenden Herstellern.

Die variablen Lasten lassen sich nach DIN 1991-1 ermitteln. Dabei wird nach Wind-, Schnee- und Nutzlast unterschieden. Als Sicherung gegen Windsog genügt in den meisten Fällen das Eigengewicht des Substrats. Bei höheren Substratschichten kann allerdings gegebenenfalls ein Abstand zu besonders belasteten Rand- und Eckbereichen notwendig werden, welcher meist in Form von Kiesstreifen oder Plattenbelag realisiert wird. Die Schneelast kann entsprechend der Vorgaben aus DIN 1991-1 angenommen werden und ist nicht Gründachspezifisch. Die Nutzlastberechnung entfällt in den meisten Fällen der extensiv begrünten Dächer, da es sich zumeist um ungenutzte Dächer handelt, die lediglich zu Wartungszwecken begangen werden. Bei intensiv begrünten Dächern ist eine Nutzlast für die Pflege des Daches anzunehmen und eine Berechnung nach selbiger Norm obligatorisch.

Baupraktisch kann für überschlägige Ermittlungen bei extensiv begrünten Dächern von einer zusätzlichen Dachlast von $3,5 \text{ kN/m}^2$ ausgegangen werden. (vgl. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau und Liesecke 1989)

Zudem kann es notwendig sein, besondere Einzellasten, wie z.B. Bäume, gesondert zu berücksichtigen. Diese sind ggf. auch über die dynamischen Lasten anzusetzen.

Bei der Planung sollte zudem beachtet werden, dass Gründächer zwar eine gewisse Eigenlast aufweisen, dadurch aber die Lasten anderer Dachaufbauten, wie z.B. Kiesdächern, entfallen und somit Gründächer teilweise statisch günstiger als andere Dacharten sein können.

Dachabdichtung

Die Dachabdichtung muss bei Gründächern besonders hohe baukonstruktive Anforderungen erfüllen, damit das Wasser, welches im Substrat gebunden ist oder durch Evapotranspiration abgegeben wird, nicht in die Dachkonstruktion eindringen kann. Wie bereits im Schichtaufbau erwähnt, wird dazu ein wasserdichter Wurzelschutz als unterste Lage oberhalb der Konstruktionsebene eingebracht. Um Stauwasser zu verhindern muss entsprechend ein Ablauf des Wassers in ausreichender Menge eingeplant werden, wobei auch Starkregenereignisse berücksichtigt werden sollten. Für den Fall besonders hoher Wassermassen auf dem Dach, wie z.B. bei Teichen, sollten zusätzliche Vorkehrungsmaßnahmen getroffen werden. (vgl. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau Arbeitskreis Dachbegrünung u. a. 2002)

Eine selten eingesetzte Variante ist der Bau einer „Weißen Wanne“ mittels Beton, der nach dem Abbinden wasserundurchlässig wird. In diesem Fall entfallen entsprechend Wurzelschutz und Abdichtung. (vgl. Kolb 2016, 33)

Genauere Angaben dazu finden sich auch in den Normen DIN 18195 Bauwerksabdichtungen, DIN 18531 Abdichtung von Dächern und den Flachdachrichtlinien.

2.1.4 Begrünungsarten

Gründächer lassen sich nach Bewuchs und Substratstärke in verschiedene Arten einteilen. Dabei wird hauptsächlich zwischen extensiv und intensiv begrünten Dächern unterschieden. Eine Sonderform bildet die sogenannte einfache Intensivdachbegrünung, welche eine Kombination aus ersteren beiden darstellt. In nachfolgender Tabelle und in den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Arten betrachtet:

	Extensivbegrünung	Einfache Intensivbegr.	Intensivbegrünung
Kategorie	Ökolog. Schutzbelag	Gestaltete Begrünung	Gepflegter Garten
Pflanzenarten	Moos, Sedum, Trocken- gräser, Sukkulenten	Gräser, Stauden, Sträu- cher	Rasen, Stauden, Sträu- cher, Bäume
Substratstärke	6 – 20 cm	12 – 25 cm	15 – 200 cm
Gewicht	60 – 250 kg/m ²	15 – 300 kg/m ²	200 – 3.000 kg/m ²
Pflegeaufwand & Kosten	Gering	Mittel	Hoch

Tabelle 1 Vergleich der Begrünungsarten
Quelle: (vgl. Ansel, Zeidler, und Esch 2015, 13 Tab. 1)

Extensive Dachbegrünung



Abbildung 3 Extensiv begrüntes Dach Wasser

Quelle: <https://www.gruenwert.at/wp-content/uploads/2015/04/ED6-e1429269550975-1024x906.jpg>,
abgerufen am 29.05.2022

Ein extensiv begrüntes Dach zeichnet sich hauptsächlich durch eine nur geringe Substratstärke aus, die baupraktisch meist zwischen fünf und fünfzehn Zentimetern liegt. (vgl. Kolb

2016, 51) Dies spiegelt sich in den relativ geringen Flächenlasten dieser Gründächer wieder. Entsprechend muss die Dachkonstruktion vor allem bei Altbauten nur gering oder gar nicht zusätzlich ertüchtigt werden. Auch bei Neubauten kann die tragende Schicht dünner ausgeführt werden, sodass dort Material und Konstruktionshöhe eingespart werden können. Letzteres wird zudem durch die geringe Substrathöhe begünstigt. Da die Wasserspeicherkapazität des Substrats damit auch relativ gering ist, muss auf Pflanzen mit hoher Wasserspeicherkapazität zurückgegriffen werden. Gern werden dafür Sukkulenten verwendet. Auch Pflanzen mit hoher Resistenz gegen Trockenheit, wie einige Gräser und Stauden, sind beliebt. Die Wuchshöhe aller Pflanzen dieser Art beträgt meist nicht mehr als zwanzig Zentimeter. Aufgrund der anspruchslosigkeit gestaltet sich hier die Pflege auch recht einfach. (vgl. Kolb 2016, 118)

Intensive Dachbegrünung



Abbildung 4 Intensiv begrüntes Dach Wasser

Quelle: <https://www.hamburg.de/contentblob/4403460/8461a0ef29197fcac930a6d4c82de5ad/data/b-optigruen2.jpg>, abgerufen am 29.05.2022

Im Gegensatz zu den extensiven Gründächern weisen intensive Dachbegrünungen eine hohe Substratstärke auf. Diese beginnt zwar ebenfalls bei fünf Zentimetern, kann aber bis zu 200 Zentimetern reichen. Folglich müssen die intensiven Gründächer statisch gesondert berücksichtigt werden und sind nicht mehr so universell auf fast allen Dächern einsetzbar wie extensiv begrünte Dächer. Der Vorteil von intensiv begrünten Dächern liegt in ihrem ökologi-

schen Mehrwert. Der natürliche Oberboden wird sowohl hinsichtlich des Materials als auch hinsichtlich der Stärke naturnah reproduziert. Somit sind als Vegetation auch Gewächse und Gehölze möglich, die deutlich höhere Wuchshöhen aufweisen. Gleichwohl können die Dächer auch genutzt werden: So sind neben der generellen Begehbarkeit auch eine gärtnerische Nutzung oder ein Nutzpflanzenanbau vorstellbar. Auch zusätzliche Elemente, wie z.B. Teiche, können je nach Dachart angelegt werden. Der Gestaltung und Wahl der Vegetation sind hierbei nur wenige Grenzen gesetzt. Nachteilig ist allerdings, dass diese Art von Dächern einen deutlich höheren Pflege- und Wartungsaufwand besitzt. (vgl. Kolb 2016, 53ff.)

Einfache Intensivdachbegrünung



Abbildung 5 Einfach intensiv begrüntes Dach
Quelle: Philipp Hänicke

Eine Kombination aus beiden genannten Arten bildet die einfache Intensivdachbegrünung. Als Unterart der Intensivdachbegrünungen wird hierbei eine Substratstärke gewählt, welche nur geringfügig höher als die der extensiv begrünter Dächer ist und zwischen fünfzehn und zwanzig Zentimetern liegt. Dadurch werden die Gestaltungs- und Vegetationsmöglichkeiten der intensiv begrünter Dächer zwar deutlich eingegrenzt, aber es ermöglicht eine gewisse Pflanzenvielfalt unter gärtnerischer Pflege des Daches, welcher aber weniger als bei intensiv begrünter Dächern ist. (vgl. Kolb 2016, 48)

2.1.5 Wasserhaushalt

Die Besonderheit von Gründächern im Vergleich zu unbegrüntem Dächern ist, dass aufgrund der Bepflanzung dem Gründach entsprechende Mengen an Wasser zugeführt werden müssen. Der Eintrag von Wasser kann auf natürliche Weise in Form von Niederschlag erfolgen oder mittels einer künstlichen Bewässerung erfolgen.

Bewässerung & Entwässerung

Im Gegensatz zu unbegrüntem Dächern, bei denen es darum geht, auftreffendes Wasser auf schnellstem Wege abzuführen, beabsichtigt man mit Gründächern, das Niederschlagswasser zu speichern. Dabei soll das Wasser den Pflanzen als Lebensgrundlage dienen und, wenn möglich, durch Evapotranspiration wieder an die Umgebung abgegeben werden. Bei begrüntem Dächern muss damit nur ca. 30% des anfallenden Regenwassers abgeführt werden; der Rest evaporiert über die Pflanzen. (vgl. Reiche 1991, 38)

Künstliche Bewässerung ist nur dann notwendig, wenn die Vegetation nicht mehr ausreichend über das Regenwasser versorgt werden kann, was zum Beispiel bei Dürreperioden der Fall ist. Dabei sind die auf extensiv begrüntem Dächern verwendeten Sukkulente meist resistenter, intensiv begrünte Dächer müssen hingegen oft bewässert werden. Als Varianten kommen dabei Beregnungsanlagen, Schläuche, Wasseranstau in der Drainage oder im Substrat integrierte Tröpfchenbewässerung zum Einsatz. (vgl. Ohlwein 1989, 27) In allen Varianten kann mittels im Gründach verbauter Sensorik eine Bewässerung anhand des tatsächlichen Bedarfs sichergestellt werden.

Die Entwässerung findet über einen oder mehrere Dachabläufe statt, deren Menge sich aus der Niederschlagsmenge, der Einzugsfläche auf dem Dach und dem Abflussbeiwert errechnen lässt. Letzterer ist abhängig vom Aufbau des Gründaches und dessen Wasserspeicherkapazität. (vgl. Reiche 1991, 39)

Regen- & Grauwasser

Für eine künstliche Bewässerung eines Gründachs bietet es sich zunächst an, das anfallende Regenwasser direkt zu verwenden statt abzuführen. Zur Zwischenspeicherung von größeren Regenmengen, z.B. bei Starkregenereignissen, können hierbei Tonnen, Zisternen oder ähnli-

che Sammelbehälter verwendet werden, die dann das Gründach in Perioden mit geringerem Niederschlag versorgen. Dieses Wasser kann man zudem zusätzlich – falls es nicht für das Gründach gebraucht wird – als Brauchwasser im Haushalt einsetzen. (vgl. Dürr 1994, 86)

Eine bisher wenig angewandte und im Potential oft unterschätzte Möglichkeit stellt die Verwendung von Grauwasser dar. Grauwasser beschreibt schwach verunreinigte Abwässer aus Dusche, Waschbecken, Badewanne, Waschmaschine oder ähnlichem, das sonst in die Kanalisation abgeführt werden müsste. Dieses Grauwasser kann direkt zur Bewässerung des Gründachs eingesetzt werden. Im Gegensatz zu Leitungswasser ist der Wuchs der Pflanzen etwas schlechter. Das lässt sich aber durch eine Aufbereitung des Grauwassers in Form von Filterung, Pflanzenklärung oder ähnlichem ausgleichen, so dass die Unterschiede nur noch minimal sind. Damit ist ein ökonomischer Einsatz von Grauwasser sinnvoll, welcher zudem auch ökologisch nachhaltig ist. (vgl. Walker und Schenker 2016, 17)

2.2 KLIMATISCHER NUTZEN

Durch die Urbanisierung seit dem 19. Jahrhundert und der daraus resultierenden hohen Bebauungsdichte in Kombination mit dem sich aktuell verstärkenden Klimawandel ergibt sich die Notwendigkeit, dessen negative Auswirkungen auf den städtischen Lebensraum zu verringern. Neben technischen Einzellösungen bieten Dachbegrünungen den Vorteil, gleich mehrere Bereiche zeitgleich abzudecken: Sie könne Regenwasser temporär speichern und langsam an die Natur abgeben und somit Dürreperioden abfedern. Zeitgleich bilden Sie durch Verdunstung über die Pflanzenoberflächen einen natürlichen Klimapuffer. Die Pflanzen selbst tragen derweil zur Erhöhung der Artenvielfalt bei, indem sie Kleinsttieren einen Lebensraum bieten. (vgl. Ansel, Zeidler, und Esch 2015, 14) Deswegen sind Dachbegrünungen gerade in der heutigen Zeit des klimagerechten Bauens ein wichtiger Bestandteil nachhaltiger und ökologischer Bauweise. Gegenstand aktueller Forschung ist die Erhöhung des ökologischen Nutzwerts der Gründächer.

2.2.1 Städtisches Mikroklima

Seit die Bebauung in den Städten immer dichter wird, nehmen auch die klimatischen Probleme dabei immer weiter zu: Durch die zunehmende Versiegelung in Kombination mit stetiger Abwärme durch Heizungsanlagen, Verkehr und Industrie – verstärkt durch den globalen Klimawandel – heizt sich das Klima in der Stadt immer weiter auf, während im umgebenden ländlicheren Raum kein derartiger Hitzeanstieg stattfindet. So entstehen innerstädtische Hitzeinseln, die im Vergleich zum Umland bis zu 10°C wärmer sein können. Um die überschüssige Hitze abzuführen sind Windschneisen genauso wichtig wie eine Aufnahme der Energie durch Boden und Vegetation von Freiflächen, welche in den dicht besiedelten Gebieten rar sind. Gründächer bieten in dieser Hinsicht ein großes Grünflächen-Potential und können damit lokal die Temperatur verringern, bei gleichzeitiger Erhöhung der Luftfeuchtigkeit. Setzt man dies nicht nur vereinzelt um, sondern auf einem Großteil der städtischen Dächer, so zeigt sich dieser Effekt auch im Bezug auf das Klima der Gesamtstadt, deren Temperatur im Sommer dann signifikant um bis zu 3°C reduziert werden kann. (vgl. Ansel, Zeidler, und Esch 2015, 14f.)

Die Kühlleistung von Gründächern ist stark von der den Pflanzen des Gründachs zur Verfügung stehenden Wassermenge abhängig. Eine Bewässerung mit Trinkwasser stellt meist eine ökologisch und ökonomisch nicht zufriedenstellende Lösung dar, wohingegen die Nutzung von Grauwasser ein enormes Potential aufweist. Das maximale Kühlpotential des Daches wird ausgeschöpft, wenn die komplette zugeführte Wassermenge von den Pflanzen verdunstet. Beim Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand an den Oberflächen der Pflanzen nimmt das Wasser Wärme aus der Umgebung auf, wodurch sich die Lufttemperatur in der direkten Umgebung abkühlt. Die benötigte Energie ist abhängig von der Umgebungstemperatur und wird mit der Verdampfungsenthalpie h_{ig} angegeben, wobei die baupraktischen Werte in untenstehender Tabelle zu finden sind. Zusätzlich wird durch eine künstliche Bewässerung der Bewuchs gefördert, welcher Evapotranspiration und damit die Kühlleistung des Gründaches weiter verstärkt. (vgl. Lohaus 2021, 88f.)

Ein weiteres Kühlpotential liegt in der niedrigeren Temperatur des Grauwassers. Durch eine offene Leitungsführung kann bereits das kühle Grauwasser auf dem Weg zum Gründach Energie aus der Umgebung absorbieren. Um allerdings eine Aufnahme direkter Solarstrahlung ähnlich eines Solarkollektors zu vermeiden, sind die Leitungen verschattet zu verlegen. (vgl. Lohaus 2021, 89)

Kühlpotential

Um das Kühlpotential der Gründachkonstruktion zu quantifizieren, wird eine überschlägige Abschätzung vorgenommen. Dazu werden die in der folgenden Tabelle aufgeführten Kennwerte verwendet:

Beschreibung	Wert	Quelle
Anteil der Verdunstungsenergie an der auf die Vegetation auftreffenden Solarstrahlung	60%	(Ohlwein 1989, 19)
Tägl. Verdunstung Wasser an Blattoberfläche	0,5 l / m ² d	(Dürr 1994, 32)
Blattoberfläche bezogen auf Dachfläche	100 m ² / m ²	(Dürr 1994, 32)
Tägl. Niederschlagsmenge, Dresden, Juli	79 mm = 2,55 l / m ² d	(DWD 2021)
Verdunstungsenthalpie bei 25°C	2441,7 kJ/kg	(Baehr und Kabelac 2016, 631 Tab. 10.12)

Tabelle 2 Überschlägige Kennwerte Verdunstung

Anhand der genannten Kennwerte ergibt sich eine überschlägige Verdunstungskapazität eines Gründachs von 50 l Wasser pro m² Dachfläche. Der auftreffende Niederschlag im Sommer von 2,6 l pro m² Dachfläche macht aber nur einen Bruchteil dessen aus, was verdunsten kann. Dies spiegelt sich auch entsprechend in der Verdunstungsenergie wieder: Bei einer angenommenen Außentemperatur von 25°C wird der Umgebung durch die Verdunstung des Niederschlags Energie von etwa 6.350 kJ pro m² Dachfläche entzogen. Bei Ausnutzung der vollen Verdunstungskapazität wäre es aber möglich, durch die Verdunstung von 50 l Wasser täglich der Umgebung etwa 122.000 kJ pro m² Dachfläche zu entziehen.

Dieses überschlägige Beispiel zeigt die enorme Kapazität, die eine künstliche Bewässerung eines Gründachs mit sich bringt. Dabei kann dieser Vorgang noch optimiert werden, wie z.B. durch Intensivierung der Begrünung und damit Erhöhung der Blattoberfläche. Ein weiterer positiver Effekt ist die Wärmespeicherkapazität des Gründachs. Dadurch kann die auftretende Sonnenstrahlung gespeichert und zeitverzögert wieder abgegeben werden, was zu konstanteren Temperaturen an der Oberfläche führt. So schwankt die Oberflächentemperatur von Gründächern im Normalfall zwischen 0°C im Winter und 25°C im Sommer, während sich im Vergleich dazu ein Kiesdach zwischen 80°C im Sommer und -20°C im Winter bewegt. (vgl. Helbig 1999, 164) Damit ist die Temperaturdifferenz der Oberfläche von Gründächern mit 25K gerade mal ein Viertel der von Kiesdächern mit 100K. Empirisch ist dies bereits in einer Studie aus dem Jahre 1974 belegt, in der ein begrüntes und ein bekiestes Krankenhausdach vergleichend betrachtet wurden. Dabei wird deutlich, dass die Verdunstung auf dem Gründach deutlich erhöht und die Temperatur über diesem Dach deutlich verringert ist. (vgl. Hörschele und Schmidt 1974, 334ff.) Gleichzeitig sorgt der geringere Albedo-Wert von Gründächern gegenüber Kiesdächern für eine deutlich höhere Absorption und folglich geringerer Reflexion der Globalstrahlung. Die Evapotranspiration findet bei extensiv begrünten Dächern zwar auch statt, ist aber derart gering, dass diese in der Bilanz oft den gerade einmal den geringeren Strahlungsreflexionsanteil aufwiegt. (vgl. Hietel, Panferov, und Rößner 2016, 18ff.)

Für eine detaillierte Berechnung des Stadtklimas wird auf Software-Lösungen zurückgegriffen. Beispielhaft wird dafür das Mikroklimamodell ENVI-met als Computersimulation verwendet, welche mittels Strömungsberechnung und Thermodynamik das Mikroklima städtischer Bereiche emulieren kann. Mit jener Software wurde bereits in der Vergangenheit der quantitative Nutzen von Gründächern in Bezug auf das Stadtklima modelliert. Die Auswertung zeigte, dass im innerstädtischen Bereich bei Begrünung der Dächer eine Senkung der Umgebungstemperatur auf Straßenniveau um 2K zu erwarten ist. (vgl. Moderow 2019, 255) Dabei ist zu konstatieren, dass die Studien von kleinflächigen extensiv begrünten Dächern ausgingen. Für Intensivbegrünungen und einfache Intensivbegrünungen gibt es derzeit nur eine geringe Datenlage. Allerdings ist aufgrund der erhöhten Evapotranspiration von einem stärkeren Einfluss auf das Stadtklima auszugehen.

2.2.2 Regenwasserrückhaltung

Die Fähigkeit, Niederschlagswasser zu speichern ist ein weiterer Vorteil von Gründächern und leistet damit einen Beitrag zum Hochwasserschutz. Dabei können Gründächer etwa 50% bis 90% des anfallenden Regenwassers speichern und im Laufe der Zeit wieder abgeben, wovon das meiste über die Blätter transpiriert wird und so auf kurzem Wege wieder in den natürlichen Wasserkreislauf zurückkehrt. Dadurch werden die Abflussspitzen verringert und die daraus resultierende mögliche Überlastung von Kanalisation und anderen Abflüssen entschärft. Dies wiederum macht eine kleinere Dimensionierung von Kanälen möglich, was sich vor allem in den Erschließungskosten neuer Baugebiete widerspiegelt.

Abhängig ist die Regenwasserrückhaltekapazität vor allem von der Substrathöhe und der Dachform. Aber auch die verwendeten Gründachsysteme und die Auswahl der Vegetation selbst haben einen Einfluss darauf, wobei Sukkulente oder andere Pflanzen, die wenig Wasser benötigen, eine geringe Regenwasserrückhaltekapazität und Transpiration aufweisen. Detailliert lässt sich die Regenwasserrückhaltung mit Softwarelösungen wie „Kalypso“ oder „Storm“ berechnen. (vgl. Ansel, Zeidler, und Esch 2015, 15f.)

2.2.3 Schallschutz

Gründächer können Schall absorbieren und Schallreflexion verringern, sodass ihnen eine lärmindernde Eigenschaft zugeschrieben werden kann. Die genaue Schalldämmwirkung eines Gründaches im Vergleich zu unbegrüntem Dächern lässt sich nicht pauschal festlegen und beruht vielmehr auf Eigenschaften des jeweil genutzten Gründachs wie Vegetationsstruktur, Deckungsgrad der Vegetation und die Substrathöhe. Die Angaben verschiedener quantitativer Untersuchungen unterscheiden sich dabei stark und reichen von 2 bis 12 dB bei der Minderung des Reflexionsschalls und 3 bis 46 dB bei der Schallabsorption. (vgl. Mann 2020)

2.2.4 Biodiversität

Die biologische Artenvielfalt von Gründächern spielt zwar oft eine eher untergeordnete Rolle, ist aber dennoch ein wichtiger Gesichtspunkt für eine nachhaltige Bauweise. Denn Pflanzen haben nicht nur die Eigenschaft, ihre Umgebungsluft zu reinigen, indem sie schädliche Stoffe aus dieser herausfiltern, sondern sie bieten zeitgleich je nach Art unterschiedlichsten Tieren einen Lebensraum. In extensiv begrünten Dächern siedeln sich vor allem Kleinstlebewesen und Mikroorganismen an, während sich auf intensiv begrünten Dächern eine noch deutlich größere Artenvielfalt mit Insekten, Vögeln und anderen auch größeren Lebewesen widerspiegelt. Hier spielen auch viele Symbiosen eine Rolle, die die Pflanzen und Tiere miteinander eingehen und so eine natürliche Lebensgemeinschaft bilden, von welcher auch das Gründach selbst profitiert. (vgl. Reiche 1991, 16)

Hauptsächlich dienen Gründächer in Städten als „Trittsteinbiotope“: Sie sind Ersatzlebensräume für Tierarten, die durch Bodenversiegelung und Sterilität der Stadt vertrieben wurden und so einen Rückzugsort für jene bieten. Deswegen finden sich dort auch viele Pionierlebewesen. Neben Bienen, Schmetterlingen und Käfern finden sich auch Tierarten, die sich auf der Liste der gefährdeten Arten befinden. Dafür nötig ist allerdings auch eine florale Artenvielfalt, die zumeist in der baupraktischen Umsetzung an Kostengründen scheitert, da die Verwendung von Sukkulente n deutlich wirtschaftlicher ist. (vgl. Ansel, Zeidler, und Esch 2015, 16)

2.2.5 Sommerlicher Wärmeschutz & Energieeinsparung

Im Sommer kann das Gründach nicht nur zur Verbesserung des städtischen Mikroklimas beitragen, sondern auch sinnvoll als sommerlicher Wärmeschutz für das Gebäude selbst genutzt werden. Die kühlende Wirkung der Verdunstung über die Pflanzenoberflächen und die dämmende Wirkung des Gründachsubstrats sorgen für ein deutlich kühleres Klima rund um das Gebäude, was sich wiederum auch positiv auf die Innenräume auswirkt. Dabei ist vor allem der Zeitraum relevant, in dem der Komfortbereich für die Temperatur überschritten wird. In Innenräume sind hierzu DIN EN ISO 15251, DIN EN ISO 7730, sowie die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) und die Arbeitsstättenrichtlinie (ARS) maßgebend. Daraus resultierend ist das Ziel, eine Temperatur von maximal 26°C im Raum mit nur wenigen Stunden über diesem Grenzwert zu erreichen. (vgl. Lohaus 2021, 89f.)

In verschiedenen Studien wurde bereits die kühlende Wirkung von Gründächern in Bezug auf den Innenraum untersucht, wobei hier aus geografischer Sicht nur der mediterrane und tropische Raum betrachtet wurde. (vgl. Theodosiou 2003) Im Gegensatz dazu ist in Deutschland aufgrund der winterlichen Kälte die Dachkonstruktion bereits wärmegeklämt, weshalb durch das Gründach nur eine zusätzliche dämmende Wirkung erreicht werden kann. (vgl. Lohaus 2021, 91)

Außerdem ist eine Quantifizierung der Wärmedämmeigenschaften des Substrats nur schwer möglich, da diese von der Durchfeuchtung des Substrats abhängt. So schwankt diese zwischen 0,1 und 3,3 W/mK. (vgl. Reiche 1991, 35) Die Evapotranspiration begünstigt durch Absenkung der Umgebungstemperatur um das Gebäude deutlich den sommerlichen Wärmeschutz, was zu Energieeinsparungen führt. Auch im Winter wird durch die zusätzliche Dämmwirkung des Gründachaufbaus eine dämmende Wirkung erreicht. Die Richtwerte für extensive Gründächer belaufen sich hierbei auf 0,53 bis 2,0 m²K/W, was einer Dämmstärke WLK 040 von etwa 20 bis 80 mm und damit einer Reduktion des Wärmeverlustes um etwa 3,3% bis 10,2% entsprechen würde. (vgl. BGL e.V. 2014, 9)

2.3 KOSTENAUFWAND

2.3.1 Investitionskennwerte

Zu konstatieren ist zunächst, dass Investitionskennwerte zumeist eine Abbildung von konkreten Baupreisen darstellen. Diese können sich aufgrund von Marktschwankungen, Ort und Zeitraum jedoch stark verändern und auch so von den genannten Preisen jederzeit abweichen; die genannten Preise sind daher eher als Orientierungshilfe zu verstehen.

Die Herstellungskosten für Gründächer variieren je nach Art des Gründachs und liegen dabei zwischen 33 €/m² für extensiv begrünte und 123 €/m² für intensiv begrünte Dächer. (vgl. Kolb 2016, 143ff.) Dabei liegen die Kosten noch einmal deutlich unter den Investitionskosten für wohnungsnah, bodengebundene Grundflächen. Daher ist die Ausbildung von Gründächern der Herstellung von zusätzlichen freien Gartenflächen oder Ausgleichflächen ökonomisch vorzuziehen. (vgl. Kolb 2016, 145)

Bei Systemlösungen der Firma Optigrün bewegen sich die Herstellungskosten für extensiv begrünte Dächer je nach Art zwischen 23 und 44 €/m² Dachfläche. Intensiv begrünte Dächer bewegen sich als Gartendächer schon für 40 bis 55 €/m² zu erhalten; Landschaftsdächer ab 75 €/m². Solar Gründächer auf Basis extensiv begrünter Dächer sind für 75 bis 90 €/m² erhältlich. (vgl. Donau 2022, 15 ff. Tab 6-13)

Die Kosten für Bewässerungssysteme belaufen sich auf 204,67 bis 262,28 € zuzüglich Einbaukosten und sind damit eher moderat. (vgl. Donau 2022, 23 Tab. 14) Entwässerungssysteme sind zwar nötig, aber auch bei nicht begrünten Dächern notwendig, sodass diese nicht als zusätzliche Kosten angesehen werden.

Je nach Art der Pflanzen sind die Kosten dazu separat zu bemessen. Bei den oben genannten Systemlösungen sind diese bereits mit eingepreist. Zudem sind für die Fertigstellungspflege, d.h. Anzucht der Pflanzen bis zu einem gewissen Deckungsgrad über ca. 12 bis 15 Monate, zusätzliche einmalige Pflegekosten zu veranschlagen. (vgl. Donau 2022, 28)

2.3.2 Fördermöglichkeiten

Gründächer können auf verschiedene Art und Weis gefördert werden. Zu einen können sie aufgrund ihrer dämmenden Wirkung als energieeffiziente Maßnahme gefördert werden. Dafür bietet beispielsweise die staatliche Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) die Kredite 261 und 262 Förderungen in Höhen von bis zu 60.000 € je Wohneinheit an. Der Bund selbst fördert über das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) ein Gründach als Einzelmaßnahme bei Hinzuziehen eines Energieeffizienz-Experten mit 20% der Investitionskosten und 50% der Kosten für Planung und Baubegleitung. Zusätzlich gibt es einige Förderprogramme der Bundesländer: Die Stadt Hamburg fördert allgemein Gründächer mit bis zu 50% der Investitionskosten und bis zu 100.000 €. Die Stadt Bremen fördert ebenfalls alle Gründächer, dort aber nur bis zu 30% der Investitionskosten und bis zu 6.000 €. Dafür ist dort aber eine Förderung biodiversitätsfördernder Maßnahmen von 5 €/m² möglich. Des Weiteren gibt es zudem verschiedenste kommunale Fördermöglichkeiten, die von den Städten und Gemeinden selbst initiiert werden. Wichtig ist zudem, dass für den Fall, dass das Dach als Solar Gründach genutzt wird, eine Förderung der PV-Module nicht durch die Förderung des Gründachs beeinträchtigt ist, da beide separat betrachtet werden. (vgl. Donau 2022, 29f.)

Zu beachten ist grundsätzlich, dass Fördermöglichkeiten meist nur temporäre Gültigkeit besitzen. Die hier genannten Fördermöglichkeiten waren zum Zeitpunkt der Erstellung im Juli 2022 nutzbar.

2.3.3 Unterhaltungskosten

Finanzielle Vorteile erfährt der Besitzer durch die Grauwasser-Nutzung, da dies nicht kostenpflichtig mit dem Abwasser entsorgt werden muss, sodass die Abwassergebühren deutlich geringer sind, da diese nur noch für das nicht als Grauwasser nutzbare Brauchwasser und den Dachabfluss des Grauwassers entrichtet werden muss. Da die Pflanzen aufgrund der Bewässerung auch größer sind, kann das auftreffende Regenwasser zudem besser aufgenommen werden und verdunsten, sodass davon ebenfalls weniger kostenpflichtig entsorgt werden muss. (vgl. Dürr 1994, 84ff.) Nutzt man Trinkwasser zur Bewässerung, so sind Kosten von ca. 2,64 €/m³ einzuplanen; nutzt man hingegen Grauwasser, so können Abwassergebühren in Höhe von 2,25 €/m³ eingespart werden. (vgl. Donau 2022, 35 Tab. 18)

Für die Pflege der Pflanzen sind je nach Art der Begrünung zusätzliche Kosten einzuplanen. Diese reichen bei extensiv begrünten Dächern von 0,50 bis 2,00 €/m² Dachfläche bis hin zu 4,00 bis 10,00 €/m² Dachfläche bei intensiv begrünten Dächern, da die intensiv begrünten Dächer deutlich mehr Zeitaufwand an Pflege pro Jahr benötigen. Dächer mit einfacher Intensivbegrünung sind hierbei kostentechnisch den intensiv begrünten Dächern zuzuordnen, bewegen sich aber am unteren Rand der Preisspanne. (vgl. Donau 2022, 34 Tab. 17)

Allerdings ist es bei Gründächern durchaus möglich, dass kritische Phasen auftreten, in denen deutlich erhöhte Kosten für die Unterhaltung anfallen. Dies ist der Fall, wenn z.B. durch Schädlingsbefall die Vegetation derart geschädigt wurde, dass eine aufwändige Pflege oder gar ein Austausch nötig werden, um einen Totalausfall zu verhindern. Ohne Behandlung wäre in diesem Fall mit einem starken Leistungsrückgang des Daches und einem damit einhergehenden Verlust der klimatischen Funktion des Daches zu rechnen. Dem vorbeugend ist eine regelmäßige Pflege und Prüfung des Gründaches zu empfehlen. Aber auch Extremwetterereignisse, wie sie auch in Zukunft noch stärker und öfter zu erwarten sind, können das Dach nachhaltig schädigen, zum Beispiel durch Starkregenereignisse und der damit verbundenen Überschwemmung des Daches. Hitzewellen können ebenfalls zu Problemen auf dem Dach führen, da mehr Wasser benötigt wird bei einer zeitgleich entstehenden Grauwasser-Knappheit, die ggf. teuer aus dem Trinkwassernetz ergänzt werden müsste. Gründächer sind allerdings gerade bei Extremwetter eine bessere Alternative zu unbegrünten Dächern, da sie die darunterliegende Konstruktion besser schützen. (vgl. Donau 2022, 36)

3 GRÜNDACH-PROJEKT



Abbildung 6 Forschungsfelder im Botanischen Garten Dresden

Quelle: Philipp Hänicke

Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes zwischen Instituten der Technischen Universität und mehrerer Praxispartner werden auf einem Dach auf dem Gelände des Botanischen Gartens in Dresden in verschiedenen Testfeldern einzelne Einfach Intensivdachbegrünung in verschiedenen Ausführungen und unter verschiedenen Methoden bewässert, um deren mikroklimatisches Potential zu ermitteln

3.1 PROJEKTDESCHEIBUNG

Das „Modellprojekt Integrales Wassermanagement mit einfacher Intensivdachbegrünung“ befasst sich mit den Möglichkeiten, die Dachbegrünungen zur Verbesserung des mikroklimatischen Milieus zu nutzen, mit besonderem Augenmerk auf dem Kühleffekt durch Evapotranspiration der Pflanzen. Aufgrund des geringen Schichtaufbaus und der damit verbundenen niedrigen Wuchshöhe der Pflanzen ist bei extensiv bepflanzten Gründächern die Verdunstungsleistung vor allem in Hitze- und Trockenheitsperioden stark begrenzt. Abhilfe dagegen soll eine zusätzliche Bewässerung ähnlich einem intensiv bepflanzten Gründach bieten. Allerdings wäre eine Bewässerung mit Trinkwasser weder nachhaltig noch ökonomisch. Dahingegen bietet das aktuell nicht verwendete Grauwasser einen interessanten Ansatz: Nutzt man das nicht mit Fäkalien verschmutzte Abwasser aus z.B. Waschmaschinen,

Waschbecken oder Duschen und bereitet dies entsprechend für eine Nutzung zur Bewässerung auf, so wäre dies eine durchaus sinnvolle Möglichkeit.

Ziel ist es, die Auswirkungen variierender, gesteuerter Bewässerung mit aufbereitetem Grauwasser auf die Leistungsfähigkeit der Einfachen Intensivdachbegrünung zu untersuchen. Betrachtete Aspekte sind dabei das Retentionsvermögen, die Evapotranspirationsmenge, sowie die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Pflanzen selbst, das Stadtklima und die bauliche Struktur. Ziel ist die Maximierung der positiven Effekte durch Optimierung der Einflussfaktoren, um diese Art der Dachbegrünung zielgerichtet im Städtebau einsetzen zu können.

Im Botanischen Garten der Technischen Universität Dresden wurden dafür auf einem vorhandenen Dach eines Nebengebäudes Versuchsflächen in Form von insgesamt 21 Testfeldern angelegt. Diese werden mittels Grauwasser bewässert. Dazu wird das nicht mit Fäkalien verschmutzte Abwasser im Keller getrennt ausgeleitet und mittels einer Pflanzenkläranlage gereinigt. Jene dient gleichfalls als ein notwendiger Zwischenspeicher für den Fall einer nötigen Pufferung von Defiziten bei Grauwassermangel. Gemessen werden in den 21 Testfeldern die zur Bewässerung eingesetzte Wassermenge, das im Substrat gespeicherte Wasser und die über den Überlauf abgelaufene Wassermenge. Zudem werden, auch aufgrund der drei verschiedenen Expositionssituationen, die Temperaturen in verschiedenen Niveaus des Substrats in den Testfeldern, an der Gebäudeecke und der Pflanzen erfasst. Eine Wetterstation stellt den Bezug zum aktuellen Wetter während der Messung her. Darauf folgt eine statistische Auswertung der Daten, die die Bewässerung, den Einfluss der Besonnung und der Bepflanzung vergleicht. Aus Basis dessen soll eine detaillierte Prozesmodellierung erfolgen, um die Verdunstungs- und Abflussprozesse im Bodenwasserhaushaltsmodell Hydrus 2D oder SiWaPro abzubilden und die Erkenntnisse im urbanhydrologischen Niederschlags-Abfluss-Modell SWMM umzusetzen und daraus großräumliche Schlussfolgerungen abzuleiten. Daraus können dann wiederum Ansätze für den Erhalt von Vitalität und Optimierung des Stadtklimas, sowie der Urbanhydrologie von Gründächern gewonnen werden. (vgl. Optigrün International AG 2016, 5 f.)

3.1.1 Beteiligte Institute

Das Projekt wird in Kooperation verschiedener Institute der Technischen Universität Dresden, sowie den Praxispartner-Firmen Optigrün und wasserWerkstatt betrieben. Federführend ist dabei Prof.-Dipl.-Ing. Irene Lohaus, Studiendekanin Landschaftsarchitektur und Inhaberin der Professur für Landschaftsbau an der Technischen Universität Dresden.

Die Firma Optigrün International AG ist projektleitender Kooperationspartner und Mitbegründer der Projekt-Kooperation mit der Technischen Universität Dresden. Als Hersteller von Gründächern jeglicher Art verfügt die Firma als Marktführer über langjährige Erfahrung. Durch die direkte Zusammenarbeit kann ein späterer potentieller Nutzen in die Forschungsarbeit einfließen, wie auch die Forschungsergebnisse später direkt in die Konzeption der Produkte überführt werden können.

Die Professur für Landschaftsbau unter Leitung von Prof.-Dipl.-Ing. Irene Lohaus ist der federführende wissenschaftliche Partner. Ziel der Professur ist eine detaillierte Auseinandersetzung mit dem kreativen Prozess von der Planung bis zur Ausführung der Außenräume und der Definition der Material- und Detaillösungen im Bereich der Pflanzung. Dabei spielen ebenso der ressourcenschonende, wie auch zweckmäßige Einsatz von Materialien und die Anforderungen künftiger Nutzer eine entscheidende Rolle.

Die Professur für Siedlungswasserwirtschaft unter Leitung von Prof.-Dr.-Ing. Peter Krebs beschäftigt sich mit der Modellierung der Siedlungsentwässerungsmaßnahmen und der Anpassung entsprechender Stoffflussmodelle. Hierbei kann bei dem Projekt auf deren langjährige Erfahrung im Bereich des Monitorings von Kanal- und Fließgewässerung der Online-Messtechnik zurückgegriffen werden.

Die Professur für Bauphysik unter Leitung von Prof.-Dr.-Ing. John Grunewald beschäftigt sich vorrangig mit der Retention und der Evapotranspiration der Gründächer. Hierbei geht es hauptsächlich um die Auswertung der Messdaten zur Ermittlung der Retentions- und Verdunstungsmengen im Jahresverlauf, um diese dann allgemeingültig modellieren zu können.

Das Ingenieurbüro wasserWerkstatt als weiterer Praxispartner unterstützt vor allem im baulichen Bereich der Grauwasser-Aufbereitung durch langjährige Erfahrung im Bereich der Pflanzenkläranlage, um diese angepasst an die Standortverhältnisse und das Projekt optimal erstellen zu können.

Der Botanische Garten der Technischen Universität Dresden ist ebenfalls Projektpartner und stellt auf einem seiner Nebengebäude den Dachbereich als Grundlage für die Errichtung der Testfelder zur Verfügung. Gleichzeitig bietet dieser personell eine große Expertise, die für die Errichtung und die Überwachung des Forschungsareals von entscheidender Bedeutung ist. Zudem stehen durch den Botanischen Garten weitere Experten, sowie erforderliches Messequipment zur Verfügung.

Als assoziierter Partner wird zudem das Umweltamt der Stadt Dresden geführt, da dieses ebenfalls in den Projektbeirat aufgenommen wird, um einen Aufgabenträger auf lokaler Ebene zur Verfügung stehen zu haben. (vgl. Optigrün International AG 2016, 8 ff.)

3.1.2 Projektstand & bisherige Erkenntnisse

Derzeit befindet sich das Projekt in der Phase der Aufnahme der Messdaten. Zunächst wurden einige grundlegende Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden bis jetzt folgende Erkenntnisse gewonnen:

Wärmeleitfähigkeit

Mittels eines Wärmeleitfähigkeitsmessgeräts nach DIN EN ISO 22007 der Firma Isomet und einer Auflagesonde wurde die Wärmeleitfähigkeit des Substrats bestimmt. Diese lagen dabei im Bereich zwischen 0,4 bis 0,6 W/mK im trockenen Zustand und 1,3 W/mK im hochfeuchten Zustand. Da das Gerät bei Schüttungen nur ungenau arbeitet, wird dies mittels Wärmeflussplatten noch einmal genauer ermittelt. Die Wärmekapazität wird im baupraktischen Bereich als konstant angenommen und liegt für Substrat bei 1.000 J/kgK. (vgl. Lohaus 2021, 84f.)

Materialcharakterisierung

Aufgrund verschiedener Unwägbarkeiten und Unsicherheiten beim Material (Zufälligkeit der Schüttungen, nicht-lineare Transportfunktionen für die Feuchteberechnung, Porenstruktur des Substrats, Frost-Tau-Wechsel) ist eine ausführliche Materialcharakterisierung nicht ohne erheblichen Aufwand möglich. Stattdessen wird das Projekt als Langezeitversuch durchgeführt, wodurch durch definierte Trocknung entsprechende Rückschlüsse auf das Feuchteverhalten des Substrats gezogen werden können. (vgl. Lohaus 2021, 85f.)

Messdaten

Ein vollständiger Datensatz für das Jahr 2021 liegt bereits vor. Bis auf wenige Ausreißer sind die Werte plausibel. Eine Prüfung und ein Vergleich der Daten folgen im Laufe des weiteren Projektfortschritts. Bei den Messungen für die Temperaturprofile in einem Feld können bereits gut der Tag-Nacht-Fall, sowie der Unterschied zwischen Winter- und Sommerperiode abgelesen werden. (vgl. Lohaus 2021, 87)

3.2 PROJEKTSTANDORT

3.2.1 Lage in der Stadt

Der Botanische Garten der Technischen Universität Dresden befindet sich östlich vom Zentrum und grenzt direkt an den Großen Garten an. Er besteht aus einem historischen, für Besucher zugänglichen Teil und einem Forschungs- und Arbeitsbereich, auf welchem sich auch die Testfelder für dieses Forschungsprojekt befinden.

Zudem besitzt der Botanische Garten eine eigene Wetterstation, die sich ebenfalls auf dem Gelände befindet.

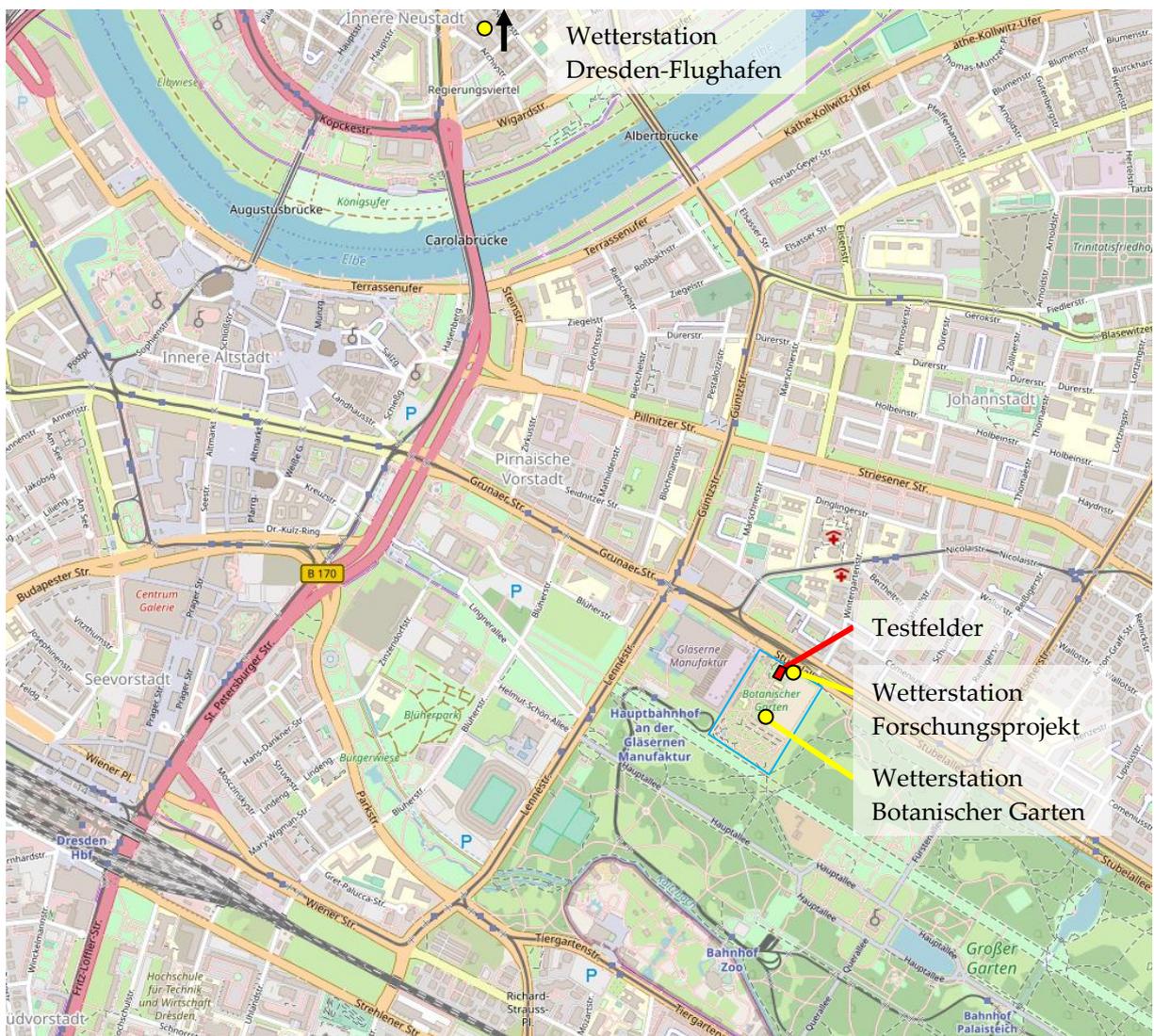


Abbildung 7 Stadtplan Dresden-Zentrum mit Botanischem Gartens

Quelle: openstreetmap.de, bearbeitet: Philipp Hänicke

3.2.2 Klimadaten



Klimadaten stehen von drei Quellen zur Verfügung:

Die Wetterstation am Flughafen Dresden im Stadtteil Klotzsche wird vom Deutschen Wetterdienst betrieben. Dort stehen alle nach WMO (Weltorganisation für Meteorologie) geforderten Messdaten zur Verfügung.

Abbildung 8 Wetterstation des Botanischen Gartens Dresden

Quelle: https://www.dresden.de/media/bilder/presse/2016/pm161028_Wetterstation.jpg, abgerufen am 22.06.2022



Zudem verfügt der Botanische Garten der Technischen Universität Dresden über eine eigene Wetterstation, deren Messdaten für das Projekt ebenfalls zur Verfügung stehen und die aufgrund der Lage direkt auf dem Grundstück auch lokal deutlich genauer sind. Die Daten werden auf den Servern des Umweltamtes der Stadt Dresden gespeichert.

Außerdem wurde über der Pflanzenkläranlage ebenfalls eine Wetterstation errichtet, welche das exakte Wetter für die Testfelder aufzeichnet. Diese erfasst folgende Kennwerte: Luftfeuchte, Temperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Net-Radiation, Niederschlag.

Abbildung 9 Wetterstation für Testfelder an der Pflanzenkläranlage

Quelle: Peggy Freudenberg

3.3 KONSTRUKTIVER AUFBAU

Die Versuchsfelder befinden sich auf dem Dach über dem Kellergeschoss-Vorbau am Verwaltungsgebäude des Botanischen Gartens Dresden. Das Verwaltungsgebäude ist ein älterer, dreigeschossiger Bau mit dem Erdgeschoss als Hochparterre, an dessen Nordecke der Keller als Vorbau hinausragt. Die Dachfläche über dem Kellergeschoss besitzt laut Planzeichnungen eine Fläche von 269 Quadratmetern. Auf dieser werden insgesamt 21 Versuchsfelder angeordnet, die je nach Besonnungsgrad, unterschiedlich bepflanzt sind und unterschiedlich bewässert werden. Als Gründachaufbau wurde eine einfache Intensivbegrünung gewählt. Da das Dach bewässert wird, kann es sich nicht um eine Extensivbegrünung handeln. Gleichzeitig sind aber auch keine gärtnerische Pflege oder weitere ökologische Nutzung des Daches vorgesehen, sodass es sich um keine vollständige Intensivbegrünung handelt.

3.3.1 Dachaufbauten

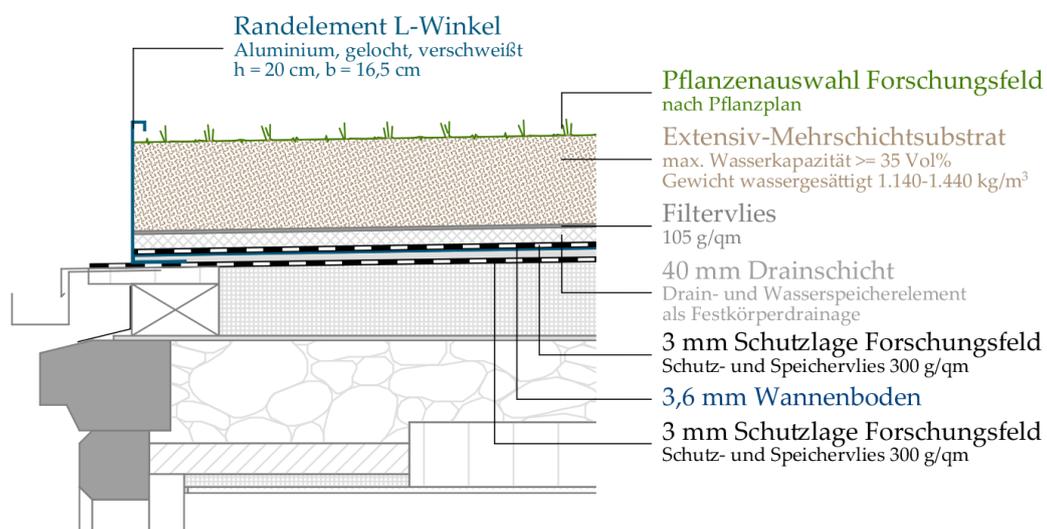


Abbildung 10 Schematischer Dachaufbau, maßstäblich

Quelle: Philipp Hänicke

Der Sockelbau des Kellers besteht aus Naturstein; das Dach ist konstruktiv als Holzbalkendecke ausgeführt, welche mit einer Schüttung aufgefüllt ist. Darüber wurde zur energetischen Aufwertung Jahre zuvor eine Dämmschicht aufgebracht, welche mit einer oberseitigen Abdichtung versehen ist. Bei dieser handelt es sich auch zugleich um die Betrachtungsgrenze des Bestandes.

Darüber wurde eine Schutzlage für die Unterkonstruktion in Form eines Schutz- und Speichervlieses mit einer Stärke von 300 g/m² aufgebracht. Auf diese Schutzlage wurden die Aluminiumwannen der Versuchsfelder aufgestellt. Diese Wannen bestehen aus einem 3,6 mm starken Wannenboden, sowie an den Rändern aus L-förmigen Winkeln als Randelemente. Diese sind verschweißt und im unteren Bereich gelocht, um ein Abfließen des überschüssigen Wassers zu ermöglichen. Im Inneren der Wannen ist der Aufbau ähnlichem einem Gründach: Als unterste Schicht dient ein Schutz- und Speichervlies mit einer Stärke von 300 g/m². Darüber befindet sich die 40 mm starke Drainschicht, die das vom Substrat abgegebene Wasser speichern und gegebenenfalls durch die Löcher der Randelemente nach außen abführen kann. Das darüber befindliche Filtervlies verhindert ein Durchdringen von im Wasser gelösten Kleinstteilen der Substrate hinein in die Drainschicht. Das darüber befindliche Substrat ist der Boden für die Pflanzen und bietet mit einer Stärke von 20 cm entsprechend viel Raum als Wurzelraum und Wasserspeicherreservoir.

Auf dem Substrat wurden, je nach Feld verschieden, die nach Pflanzplan gewünschten Pflanzen eingepflanzt.

3.3.2 Feldaufbauten

Die 21 Felder haben eine Fläche von jeweils 3,50 Quadratmetern. Diese 3 mm starken Aluminiumwannen werden dabei in zwei verschiedene Formate unterschieden: Die Felder der Gruppen I und III sind rechteckig mit Außenmaßen von 1,00 x 3,50 m. Die Felder der Gruppe II sind quadratisch mit einer äußeren Kantenlänge von 1,88 m. An den Dachkanten besitzen die Aluminiumwannen ein Randelement als L-Winkel aus gelochtem und verschweißtem Aluminium mit einer Höhe von 20 cm, welches den Abfluss des überschüssigen Wassers vom Dach ermöglicht.

Das 20 Zentimeter hohe Substrat ist eine Mischung aus Blähschiefer und -ton, Lava, Bims, Ziegelsplit, Porolith und Grünschnitt und dabei in seiner Zusammensetzung vollständig variabel, sodass keine genaue Verteilung angegeben werden kann.

Kenndaten Feldaufbau

Material Substrat	Blähschiefer, Blähton, Lava, Bims, Ziegelsplit, Porlith, Grünschnittkompost Zusammensetzung variabel
Gewicht (trocken)	$\geq 750 \text{ kg/m}^3$ (leicht) $\geq 1.000 \text{ kg/m}^3$ (schwer)
Gewicht (nass)	$1.140 - 1.440 \text{ kg/m}^3$ (leicht) $1.320 - 1.680 \text{ kg/m}^3$ (schwer)
max. Wasserkapazität	$\geq 35 \%$
Gesamtporenvolumen	$> 60 - 70 \text{ Vol}\%$

Tabelle 3 Kenndaten Feldaufbau

Quelle: (Lohaus 2021, 8f. Tab. 2)

Als Besonderheit ist zu erwähnen, dass an den ersten der Versuchsfeldern (FI.1 bis FI.3) ein Lysimeter verbaut wurde, um die Masse der Felder messen zu können. Gleichzeitig kann damit der Dachabfluss redundant ermittelt werden. Der Dachaufbau ist entsprechend ein wenig höher.



Abbildung 11 Felder FI.1 bis FI.3 mit Lysimeter und CTD-Sonden

Quelle: Philipp Hänicke

3.4 BE- & ENTWÄSSERUNG

Eine Nutzung von Trinkwasser zur Bewässerung des Gründachs wäre nicht nur ökologisch problematisch, sondern ist auch ökonomisch ungünstig. Deswegen wird auf anfallendes Grauwasser aus dem Verwaltungsgebäude des Botanischen Garten Dresden zurückgegriffen. Dort finden sich Büroräume mit Teeküchen, sowie Umkleiden mit Toiletten und Duschen. Vor dem Umbau wurde das Abwasser vollständig in die Kanalisation eingeleitet. Allerdings ist das Wasser schadstoffbelastet, was das Wachstum der Pflanzen auf dem Gründach negativ beeinträchtigen könnte. Aufgrund dessen wird das Wasser über eine Pflanzenkläranlage gereinigt.

Um das Grauwasser zu nutzen, wurde ein Umbau im Keller des Gebäudes vorgenommen: Das Abwasser aus Waschbecken und Duschen wird seither getrennt vom Abwasser der Toiletten mittels neu verlegter Leitungen gebündelt und aus dem Gebäude ausgeleitet. Von dort gelangt es in die Pflanzenkläranlage, in der es durch einen Pflanzenfilter aufbereitet wird. Von dort wird es über Pumpen auf das Dach gepumpt und mittels eines elektronisch gesteuerten Bewässerungs- und Verteilsystems den einzelnen Testfeldern zugeführt.

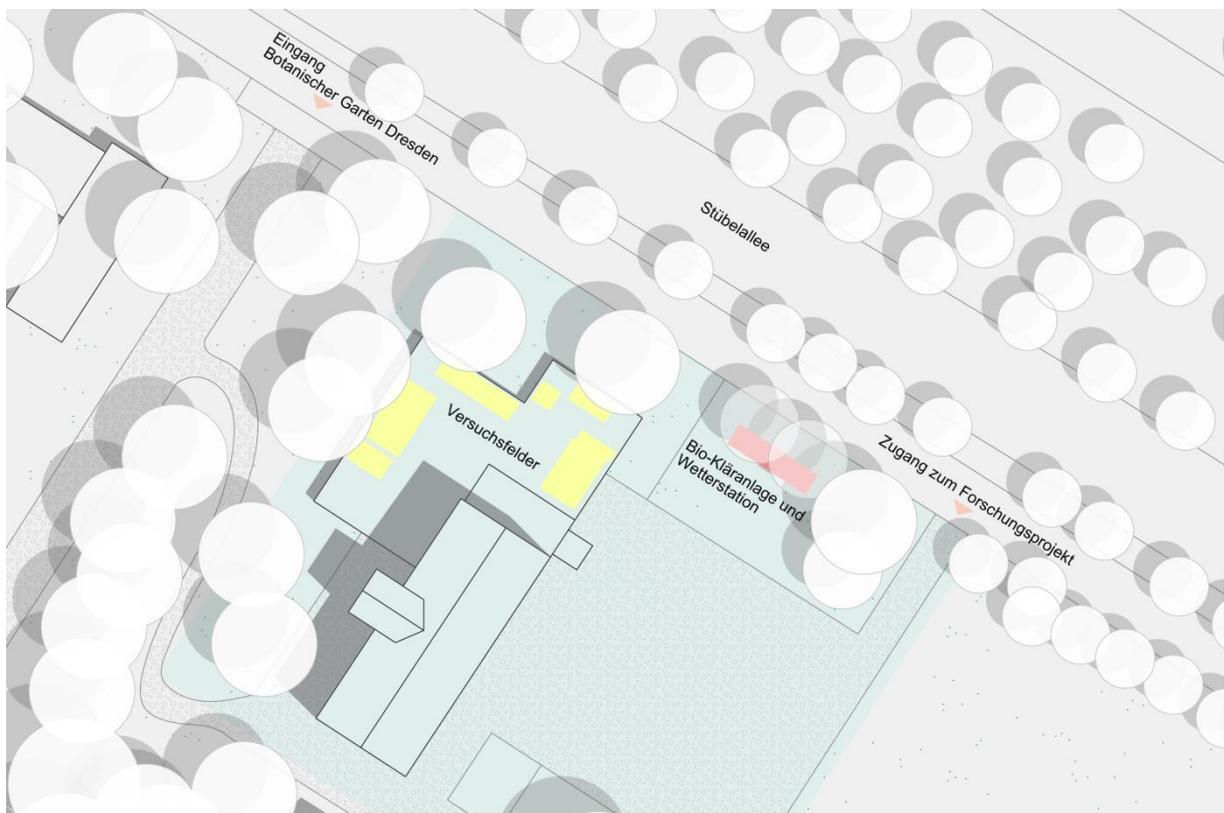


Abbildung 12 Lageplan, maßstäblich
Quelle: Alexander Swirin

3.4.1 Pflanzenkläranlage

Die Pflanzenkläranlage besteht aus drei Komponenten:

- Einem Vorseicher
- Einem bepflanztem Bodenfilter
- Einem Nachspeicher

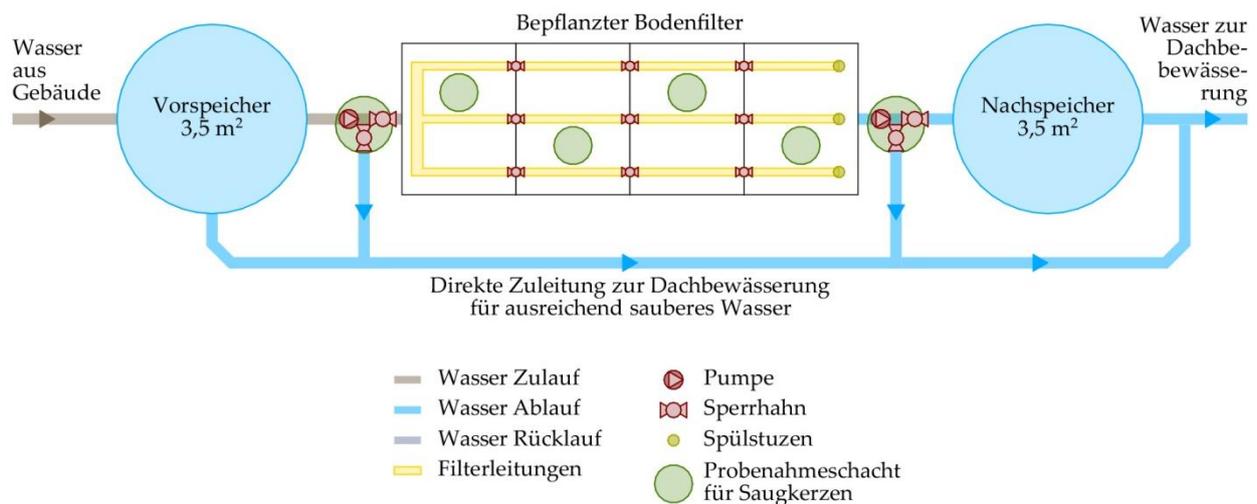


Abbildung 13 Schema Pflanzenkläranlage M 1:50
Quelle: Philipp Hänicke

Der Vorseicher fängt zunächst das anfallende Grauwasser auf und gibt es kontrolliert an den Bodenfilter weiter. Er besitzt eine Kapazität von 3,5 m² und kann so größere Mengen von Grauwasser aufnehmen. Somit kann eine konstante Grauwasser-Weiterleitung an den Bodenfilter gewährleistet werden.

Vorseicher & Nachspeicher	
Hersteller	Premier Tech Aqua
Produkt	KXDR3512
Volumen	3,5 m ³
Durchflussmenge	5 – 3.000 l/min

Tabelle 4 Herstellerangaben Vorlaufspeicher & Ablaufspeicher

Der Bodenfilter selbst besteht aus zwei Schichten: einer geringer gekörnten Filterschicht, sowie einer gröber gekörnten Drainschicht. Dadurch werden Partikel aus dem Wasser herausgefiltert, sodass das Wasser deutlich schadstoffärmer auf das Dach geleitet werden kann. Der Durchfluss des Grauwassers wird sichergestellt durch zwei am Zufluss und am Abfluss des Bodenfilters befindliche Pumpen vom Typ Grundfoss CC7-A1.

Bepflanzter Bodenfilter	
Typ	Pflanzenkläranlage nach DWA 262
Ablaufpumpe	Grundfoss CC7-A1 mit bis zu 200 l/h
Fläche	8 m ²
Filteraufbau	0,5 mm Filterschicht, Körnung 0-2mm 0,2 mm Drainschicht, Körnung 2-8mm

Tabelle 5 Herstellerangaben Bepflanzter Bodenfilter

Hinter dem Bodenfilter findet sich ein Nachspeicher gleicher Bauart wie der Vorspeicher mit einer Kapazität von ebenfalls 3,5 m². In ihm wird das gefilterte Grauwasser gespeichert, um verfügbar zu sein, sobald das elektronisch gesteuerte Bewässerungssystem das Grauwasser zur Bewässerung benötigt. Da die Bewässerung zu festen Zeiten stattfindet, wird zu diesen Zeitpunkten eine größere Menge an Grauwasser benötigt, während in die Zeiten dazwischen der Nachspeicher wieder langsam vom Bodenfilter aufgefüllt werden kann.



Abbildung 14 Pflanzenkläranlage mit Wetterstation
Quelle: Modellprojekt Integrales Wassermanagement

3.4.2 Dachbewässerung

Für die Bewässerung des Daches wird ein fertiges Bewässerungssystem der Firma UIT GmbH Dresden verwendet. Dabei führt eine zentrale Bewässerungsleitung von der Pflanzenkläranlage zu einem elektronisch ansteuerbaren Verteiler, von dem einzelne Leitungen zu jedem Feld führen.

Bewässerungssystem	
Hersteller	UIT GmbH Dresden
Produkt	Bewässerungssystem BoGa
Menge	1 Stück
Zuleitungspumpe	600 l/h, 4 mWS
Sensoren	Durchflussmessung, Füllstandssensor
Steuerung	Zeit, Wassergehalt*, Bodentemperatur* * anhand der Sensoren in den Testfeldern

Tabelle 6 Herstellerangaben Bewässerungssystem

Der Verteiler wird digital angesteuert und kann so jedes Feld getrennt bewässern. Zudem ist es möglich an dieses System Sensoren anzuschließen, sodass die Anlage darauf programmiert werden kann, nach Messwerten (z.B. Temperaturniveaus der Testfelder, Niederschlagssummen oder Bodenfeuchte) zu bewässern. So kann die Bewässerung entweder nach Zeit oder nach Messwerten gesteuert bzw. geregelt werden.



Abbildung 15 Bewässerungssystem BoGa
Quelle: Philipp Hänicke

3.4.3 Kostenaufwand

Maßgebend für die Investitionskosten der Grauwasseranlage ist vor allem die Größe der Anlage. Auch die Art der Wasseraufbereitung und der Reinigungsgrad der Filterung sind relevante Kostenfaktoren. Im Bestand ist zudem die Integration des Systems in das existierende Gebäude ein wichtiger Kostenfaktor, da im Projekt beispielsweise die Anpassung aller Bestandsleitungen nötig war.

Das in diesem Projekt verwendete System wurde zu einem Preis von 23.319,81 € gekauft, einschließlich Lieferung und Einbau. In diesem Preis sind allerdings nur die Komponenten der Grauwasser-Nutzungsanlage selbst ohne die baulichen Anpassungsmaßnahmen enthalten. Die Verlegung der Bestandsleitungen und Anschluss an die Grauwasser-Nutzungsanlage wurden vom Botanischen Garten Dresden selbst vorgenommen, sodass es keine finanzielle Aufstellung dazu gibt. Der in den Unterlagen angegebene Kostenwert von 338 €/m² für die Herstellung liegt deutlich oberhalb der für Gründächern anzusetzenden Kosten von 33,32 €/m². Dies ist allerdings zurückzuführen auf spezifische Forschungsprojektforderungen, wie z.B. zusätzliche Materialschichten. Dieser Wert ist nicht repräsentativ für andere, übliche Gründächer. (vgl. Donau 2022, 65)

	Naturdach	Forschungsprojekt
Gewicht	Ab 95kg/m ² [0,95kN/m ²]	Ab 399kg/m ² [3,99kN/m ²]
Systemhöhe	Ab 10cm	35cm
Dachneigung	0-5°	-
Vegetationsform	Kräuter-Gräser-Sedum, evtl. Gehölze	Kräuter-Gräser-Sedum
Wasserrückhalt	50-70%/Jahr	-
Spitzenabflussbeiwert	Cs = 0,3 bis 0,5	-
Wasserspeicher	30 bis 80l/m ²	-
Kosten (Brutto)	Ab 33,32€/m ²	338€/m ²
Ökologische Wertigkeit	5/5	-
Pflegeaufwand	2/5	-
Begrünungsarten	Extensiv / Einfach Intensiv	Einfach Intensiv

Abbildung 16 Gegenüberstellung Naturdach und Forschungsprojekt
Quelle: Jessica Donau

3.4.4 Dachentwässerung

Die Dachentwässerung verläuft über die bauseits am Dach angebrachte Dachregenrinne, in die die einzelnen Testfelder entwässern. Um die Menge des abfließenden Wassers zu messen, werden in die Dachrinne in der Höhe der Grenze zwischen den Testfeldern Trennwände eingebaut, sodass 21 abgetrennte Segmente in der Dachrinne entstehen, in die auch jeweils nur ein Testfeld entwässert; der übrige Teil der Dachfläche entwässert in die übrig bleibenden Bereich der Regenrinne zwischen den Feldsegmenten.

Von jedem Segment führt ein Fallrohr in einen Sammelbehälter, in dem ein Messsensor angebracht ist, welcher den Wasserstand in dem Behälter misst. Von dort entwässert das Wasser über einen Überlauf hinein in die bauseitigen Fallrohre und von dort ins Abwassersystem der Straße.

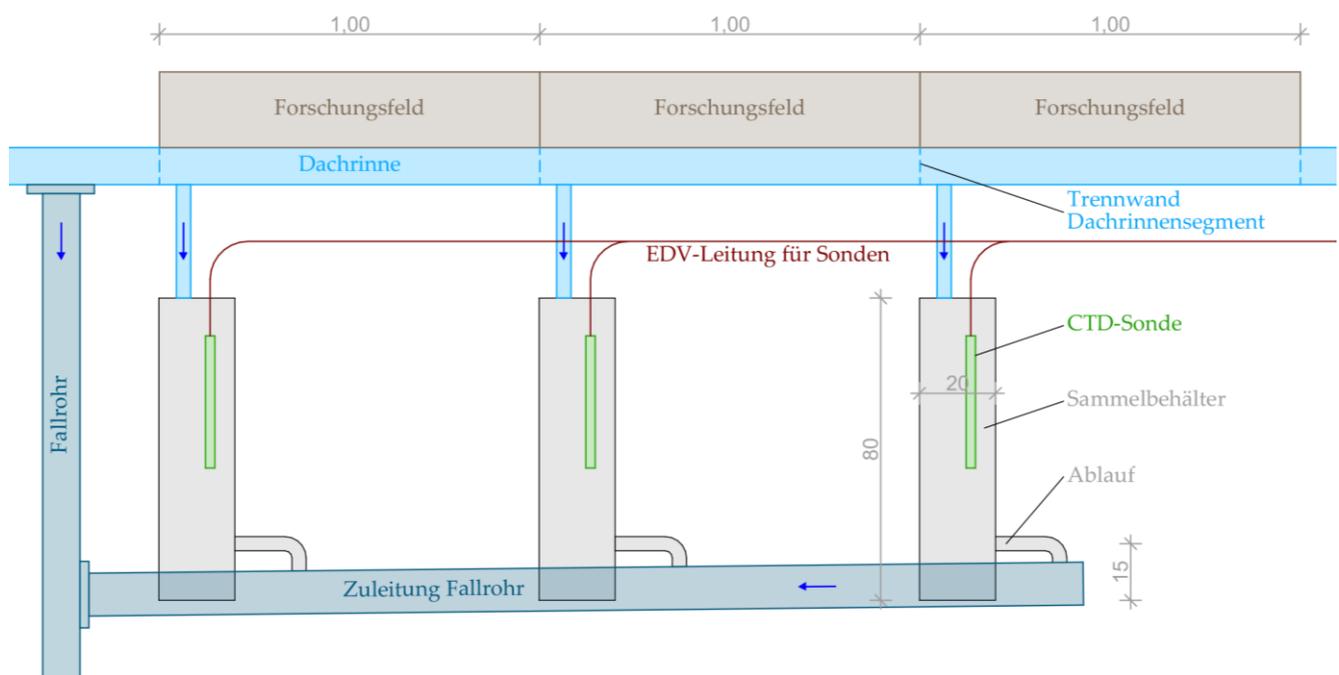


Abbildung 17 Dachentwässerung mit CTD-Sonden, M 1:20

Quelle: Philipp Hänicke

3.5 METHODIK

Um die Testfelder des Forschungsprojektes gezielt auswerten zu können, werden Parameter definiert, nach denen die Zusammenhänge zwischen Bewässerung und Evapotranspiration untersucht werden sollen.

3.5.1 Zielstellung

Ziel des Forschungsprojektes ist es, die Verdunstung über Gründächern in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern anhand der Testfelder quantitativ zu ermitteln. Dabei wird zwischen stationären und klimatischen Parametern unterschieden. Die stationären Parameter sind während der gesamten mehrjährigen Versuchsreihe konstant. Als stationäre Parameter werden folgende betrachtet:

- Bewässerungsintervall
- Besonnung
- Bepflanzung

Die insgesamt 21 Testfelder bilden verschiedene Kombinationen der stationären Parameter ab. Dazu gehören auch zwei Referenzfelder, die zum Vergleich der Daten dienen. Des Weiteren ist die Abhängigkeit von klimatischen Umgebungsbedingungen zu untersuchen. Dazu sollen die Messreihen der verschiedenen Testfelder auf Abhängigkeiten von klimatischen Standortfaktoren untersucht werden, um daraus allgemeingültige Erkenntnisse ableiten zu können. Dazu wird die Abhängigkeit von folgenden Faktoren untersucht:

- Umgebungstemperatur
- Relative Luftfeuchte
- Niederschlag

Zunächst soll anhand der Bewässerung, des Niederschlags, der Änderung der Bodenfeuchte der einzelnen Felder und des Dachabflusses die Verdunstung quantitativ ermittelt werden. Ziel soll zukünftig sein, vorhandene Berechnungsmodelle so zu modifizieren, dass für einen beliebigen Standort die Verdunstung und damit auch die klimatische Wirkung der bewässerten Gründächer berechnet und optimiert werden kann.

3.5.2 Bepflanzung & Besonnung

Besonnung

Die 21 Felder sind zunächst nach Besonnungsgrad in drei Kategorien zu unterteilen, welche von dem Projektkonsortium abweichend zur Definition nach Reif (2010) festgelegt wurden:

Feldgruppe I	Feldgruppe II	Feldgruppe III
sonnig	halbschattig	schattig

Diese Einteilung basiert auf einer anfangs durchgeführten Sonnenstudie. Dazu wurden mittels eines 3D-Modells die durch das Verwaltungsgebäude und die umgebenden Bäume verschatteten Bereiche ermittelt, sowie die durchschnittliche Besonnung verschiedener Dachregionen betrachtet.

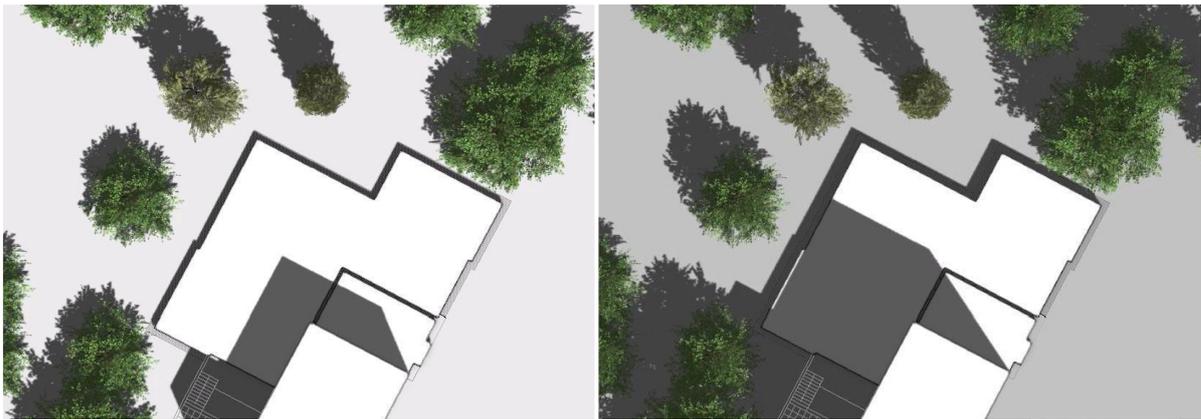


Abbildung 18 3D-Aufsicht mit Verschattung am 30.06. & 30.03. mittags
Quelle: (Lohaus 2021, 16 Abb. 7 & 8)

Feldgruppe I ist nur morgens kurz im Schatten der Bäume, sowie nachmittags im partiellen Schlagschatten des Gebäudes. Da die Fläche mehr als halbtags vollständig der Sonne ausgesetzt ist, ist dieser Standort als sonnig eingestuft worden. Feldgruppe II befindet sich morgens im Schatten der Bäume, sowie im Sommer ab dem späten Nachmittag bzw. im Frühjahr ab Mittag im partiellen Schlagschatten des Gebäudes. Da die Fläche teilweise nur weniger als halbtags besonnt ist, wird dieser Bereich als halbschattig klassifiziert. Feldgruppe III befindet sich morgens kurz im Schatten, sowie im Sommer ab dem späten Nachmittag im Schatten der umliegenden Gehölze. Im Frühjahr ist die Verschattung schon ab dem mittleren Nachmittag gegeben, aber auch eine Verschattung durch das Gebäude über die Mittagszeit

kommt hinzu. Somit wird der Standort als schattig klassifiziert, da nur eine kürzere und unregelmäßige Besonnung vorliegt. (Lohaus 2021, 15 Tab. 4)

Bepflanzung

Die Bepflanzung wurde anhand des Besonnungsgrades ausgewählt. Sowohl in sonnigen als auch in halbschattigen Bereichen ist mindestens zum Teil eine hohe Besonnung zu erwarten, sodass dort Sonnengewächse verwendet werden. Im schattigen Bereich werden Schattengewächse verwendet.

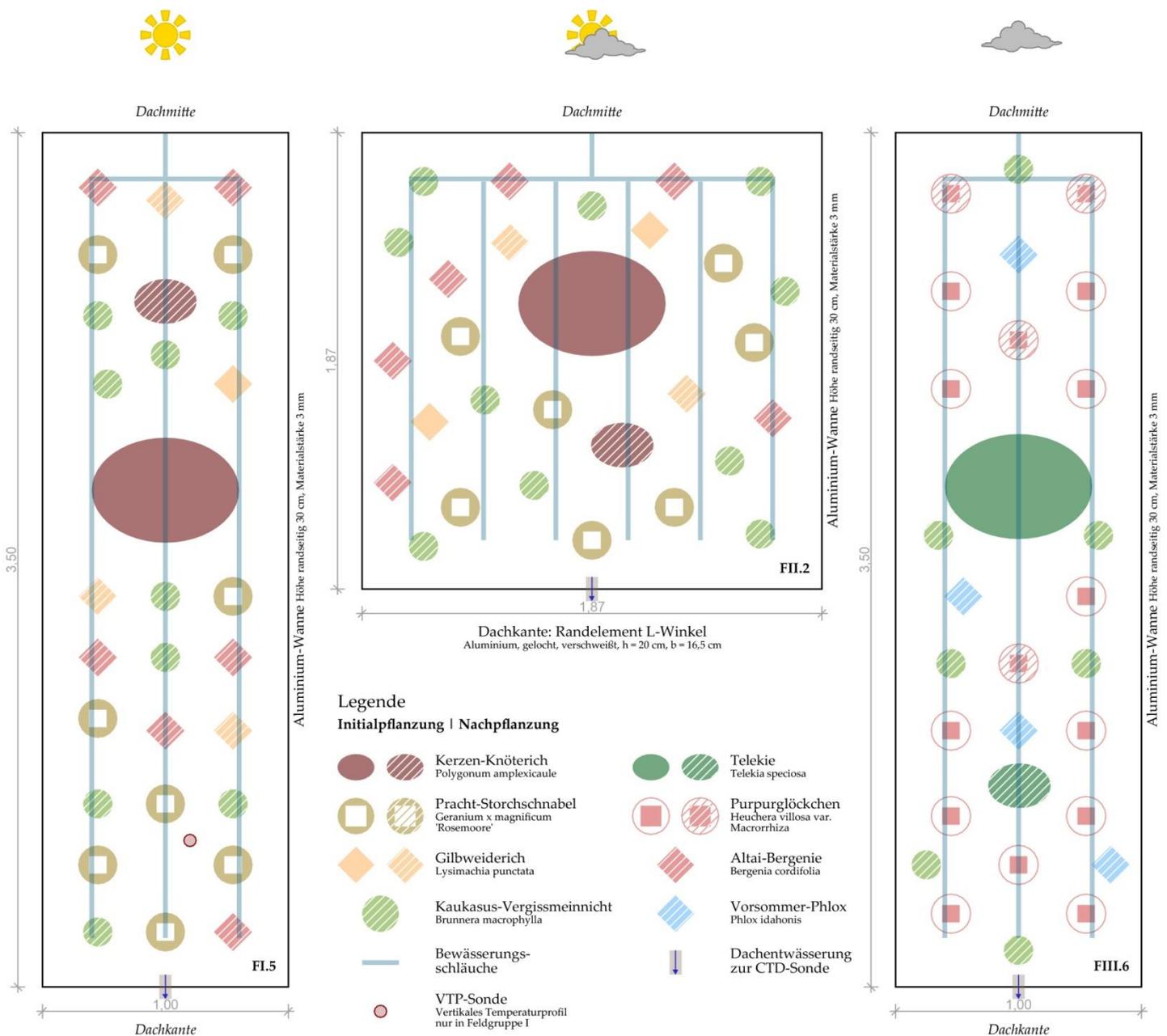


Abbildung 19 Detailgrundriss Testfelder mit Sensorik und Bepflanzung, M 1:25
 Quelle: Philipp Hänicke

Zunächst wurden für die Vegetationsperiode 2020 Pflanzen von 6 verschiedenen Typen gepflanzt, welche der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen sind:

Pflanze	Blütezeit	Höhe [cm]	Geselligkeit*
Gilbweiderich	Juni – August	80	II – IV
Kerzen-Knöterich	August - Oktober	100 – 120	I – II
Pracht-Storchschnabel	Juni & Juli, Oktober	50 – 60	III – IV
Purpurglöckchen	Juli & August	30 – 70	II
Telekie	Juni – August	150 – 200	I
Wachsglocke	August & September	70 – 100	VIII – IX

*gibt an, wie einzeln oder flächig Pflanzen gepflanzt werden sollten:

I ... einzeln oder in Gruppen bis 3 Pflanzen	II ... in Gruppen von 3 bis 10 Pflanzen
III ... in Gruppen von 10 bis 20 Pflanzen	IV ... größere Stückzahlen, meist flächig
V - X ... vorwiegend großflächig bis großflächig	

Tabelle 7 Pflanzeigenschaften

Quelle: Philipp Hänicke

Nach einem Jahr wurde ein erstes Fazit gezogen, inwieweit die Pflanzen für den Standort geeignet sind. Dabei wurde festgestellt, dass die Wachsglocke den Winter nicht überlebt hat. Auch bei den anderen Pflanzen gab es vereinzelte Ausfälle, was aber auch auf vereinzelt Witterungsereignisse zurückzuführen sein kann. Aufgrund dessen wurden die ausgefallenen Pflanzen nachgepflanzt. Die Wachsglocke wurde nicht mehr nachgepflanzt. Da zudem eine Verdichtung vorgenommen werden sollte, wurden ersatzweise drei weitere Pflanzenarten gepflanzt, welche den Pflanzenbestand ab Frühjahr 2021 ergänzen, sodass seitdem insgesamt 8 Pflanzentypen vorhanden sind. Die anfänglich gleichen Feldgruppen I und II unterscheiden sich seitdem lediglich dadurch, dass in Feldgruppe I ein Pracht-Storchschnabel mehr und dafür eine Kaukasus-Vergissmeinnicht weniger gepflanzt wurde. Der aktuelle Pflanzenbestand nach den Nachpflanzungen im Frühjahr 2021 nach der ersten Vegetationsperiode kann nachfolgender Tabelle entnommen werden:

Feld	Altai-Bergenie <i>Bergenia cordifolia</i>	Gilbweiderich <i>Lysimachia punctata</i>	Kaukasus- Vergissmeinnicht <i>Brunnera macrophylla</i>	Kerzen-Knöterich <i>Polygonum amplexicaule</i>	Pracht- Storchschnabel <i>Geranium x magnificum</i>	Purpurglöckchen <i>Heuchera villosa var. Macrorrhiza</i>	Telekie <i>Telekia speciosa</i>	Vorsommer-Phlox <i>Phlox idahomii</i>	Summe Pflanzen
	ALT	GIL	KAU	KER	PRA	PUR	TEL	VOR	
FI.1	6	4	9	1+1	8				29
FI.2	6	4	9	1+1	8				29
FI.3	6	4	9	1+1	8				29
FI.4	6	4	9	1+1	8				29
FI.5	6	1+3	9	1+1	8				29
FI.6	6	1+3	9	2	8				29
FII.1	6	4	10	1+1	7				29
FII.2	6	2+2	10	1+1	7				29
FII.3	6	2+2	10	1+1	7				29
FII.4	6	2+2	10	1+1	7				29
FII.5	6	2+2	10	1+1	7				29
FII.6	6	2+2	10	1+1	7				29
FII.7	6	2+2	10	1+1	7				29
FIII.1			7			12+4	1+1	4	29
FIII.2			7			14+2	1+1	4	29
FIII.3			7			12+4	1+1	4	29
FIII.4			7			12+4	1+1	4	29
FIII.5			7			12+4	1+1	4	29
FIII.6			7			12+4	1+1	4	29
FIII.7			7			12+4	1+1	4	29

Grün ... Neupflanzungen im Frühjahr 2021

Tabelle 8 Pflanzenbestand je Feld

Quelle: Philipp Hänicke

3.5.3 Bewässerungsintervalle

Die Testfelder werden in unterschiedlichen zeitlichen Intervallen bewässert. Dabei werden drei Intervalle unterschieden:

- Bewässerung alle 2 Tage
- Bewässerung alle 4 Tage
- Bewässerung alle 8 Tage

Bei jeder einzelnen Bewässerung werden 17,0 Liter Wasser je Testfeld aufgebracht. Diese werden über einen Zeitraum von 15,5 Minuten auf die rechteckigen bzw. 20,0 Minuten auf die quadratischen Felder bewässert. Die Bewässerung findet meist morgens um 6 Uhr statt. Um die Leitungen nicht zu groß dimensionieren zu müssen, werden die Felder, die gleichzeitig bewässert werden sollen, mit geringem Abstand zeitversetzt bewässert.

Die Bewässerung der drei Intervalltypen findet nach einem festen Bewässerungsplan (siehe unten) statt, sodass die Zeitpunkte der drei Intervalle niemals am selben Tag liegen. Insgesamt findet die Bewässerung nur in der Frostfreien Zeit statt, d.h. zwischen März/April und November. Insgesamt werden 5 Felder alle 2 Tage, 7 Felder alle 4 Tage und 6 Felder alle 8 Tage bewässert. Drei Felder dienen als Referenzfelder und werden nicht bewässert, wovon zwei Felder unbepflanzt und als Kiesdach ausgeführt sind.

Bewässerungsplan																
Tag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
alle 2 Tage	■		■		■		■		■		■		■		■	
alle 4 Tage		■				■				■					■	
alle 8 Tage				■								■				

Tabelle 9 Bewässerungsplan mit zeitlichem Versatz
Quelle: (Lohaus 2021, 69 Tab. 22)

3.5.4 Feldübersicht

In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Parameter und Messpunkte der einzelnen Felder zusammengefasst. Die Felder unterscheiden sich nach ihrer Besonnung und Bepflanzung, aber auch nach ihrer Bewässerung. Zudem ist für jedes Feld angegeben, welche Sensoren verbaut sind und damit welche Messungen vorgenommen werden.

Feld		Besonnung	Bepflanzung	Bewässerung (Intervall Dauer)		Messungen	
FI	.1	3,05 x 1,00 m	Sonnig	6x ALT	alle 2 Tage	15,5 min	CTD, WLT, VTP, LYS
	.2			4x GIL	alle 4 Tage		CTD, WLT, VTP, LYS
	.3			9x KAU	alle 8 Tage		CTD, WLT, VTP, LYS
	.4			2x KER	15,5 min	CTD, WLT, VTP	
	.5			8x PRA		alle 4 Tage	CTD, WLT, VTP
	.6			! FL4: Kies !		alle 8 Tage	CTD, WLT, VTP
FII	.1	1,88 x 1,88 m	Halbschattig	Kies	20,0 min	CTD, WLT	
	.2			alle 8 Tage		CTD, WLT, ASM	
	.3			6x ALT		alle 4 Tage	CTD, WLT
	.4			4x GIL		alle 2 Tage	CTD, WLT
	.5			10x KAU		alle 8 Tage	CTD, WLT
	.6			2x KER		alle 4 Tage	CTD, WLT
	.7			7x PRA		alle 2 Tage	CTD, WLT
FIII	.1	3,05 x 1,00 m	Schattig	alle 8 Tage	15,5 min	CTD, WLT	
	.2			7x KAU		alle 4 Tage	CTD, WLT
	.3			16x PUR		alle 2 Tage	CTD, WLT
	.4			2x TEL		alle 8 Tage	CTD, WLT
	.5			4x VOR		alle 4 Tage	CTD, WLT
	.6			WAC*		alle 2 Tage	CTD, WLT
	.7			alle 4 Tage		CTD, WLT	
	.8			CTD, WLT			

* Alle Pflanzen der Wachsglocke haben die erste Vegetationsperiode nicht überstanden, hauptsächlich aufgrund von Frostschäden. Aufgrund dessen wurden andere Pflanzenarten nachgepflanzt.

Tabelle 10 Feldübersicht

Quelle: (Lohaus 2021, 53ff. Tab. 15 bis 18), (Lohaus 2021, 71 Abb. 29)

Im Lageplan sind die Positionen der einzelnen Testfelder auf dem Bestandsdach verzeichnet. Erkennbar sind die drei Feldgruppen mit zugehöriger Besonnung. Zudem sind die Lagen der einzelnen Sensoren verzeichnet. Auf dem zweiten Teil des Lageplans finden sich die zugehörige Legende, sowie die Positionierung der Grauwasser-Aufbereitungsanlage.

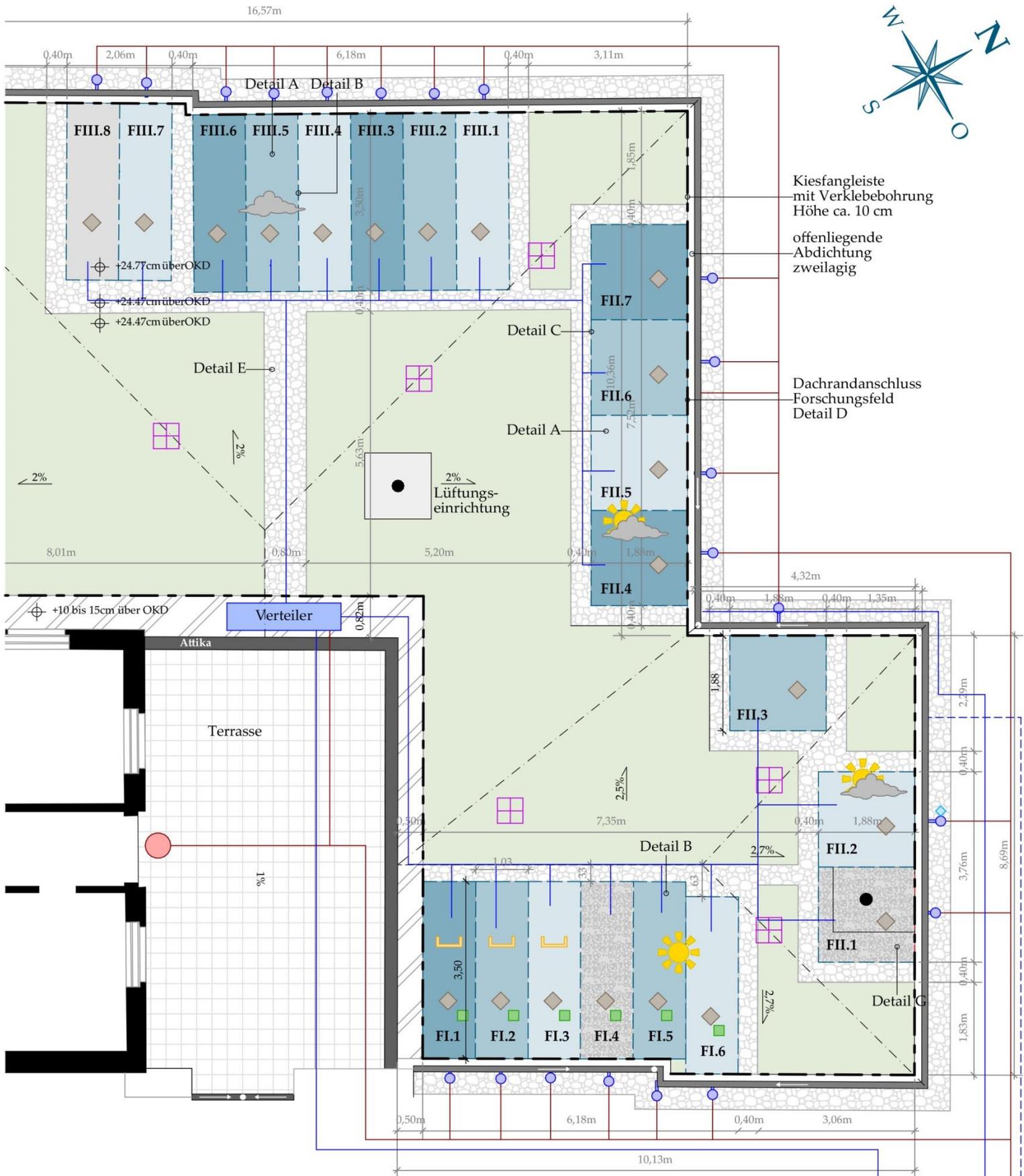


Abbildung 20 Dachlageplan M1:100 mit einzelnen Testfeldern
Quelle: Philipp Hänicke

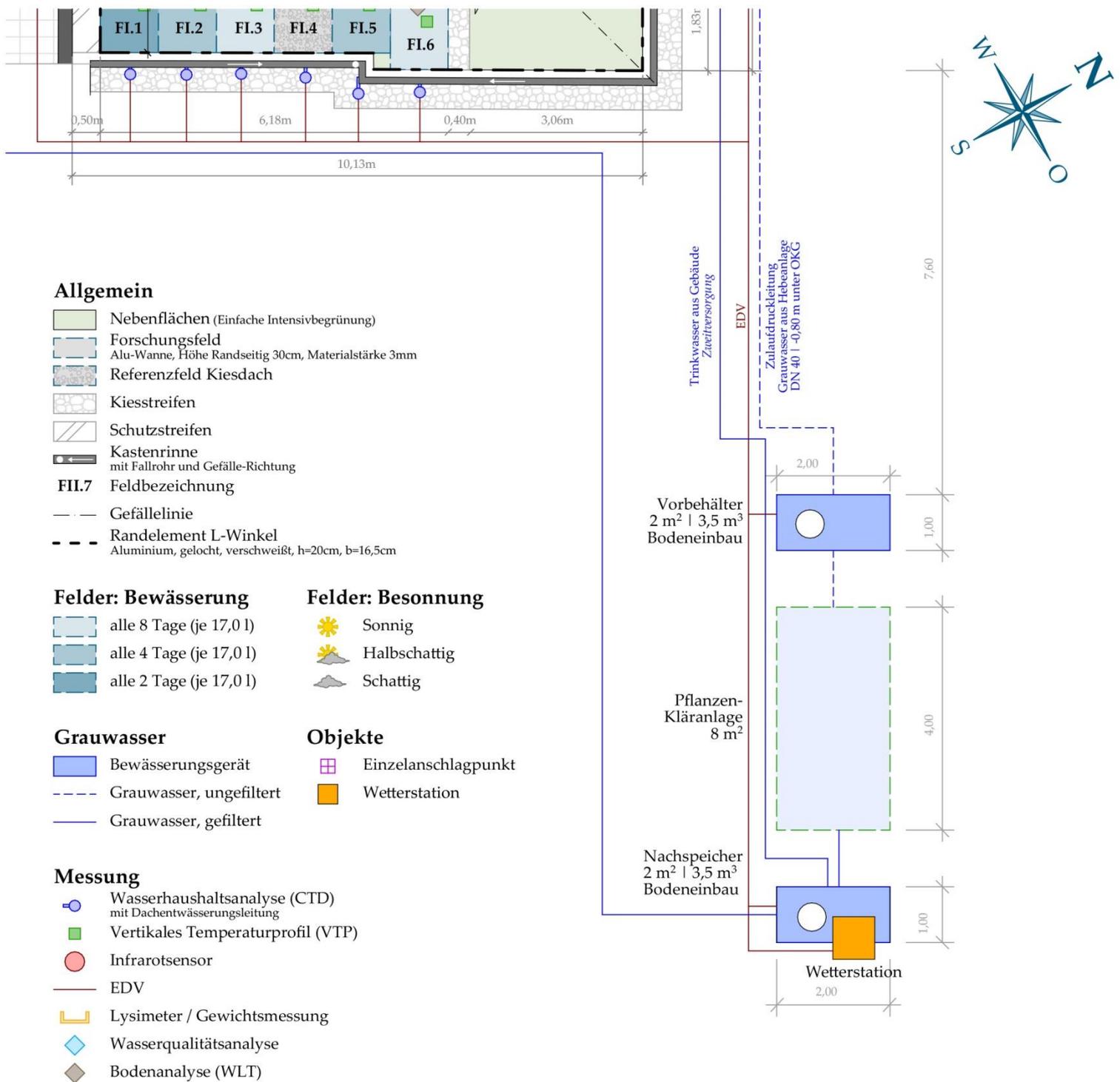


Abbildung 21 Übersichtsplan M1:100 Grauwasser-Aufbereitungsanlage
Quelle: Philipp Hänicke

3.5.5 Fotodokumentation

**Feldnummer: FI.1**

Abmessungen: 3,50 x 1,00 m
 Besonnung: Sonnig
 Bepflanzung: 29 Pflanzen
 6x ALT, 4x GIL, 9x KAU,
 2x KER, 8x PRA
 Bewässerung: alle 2 Tage
 Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
 Dachabflussmenge (LYS)
 Vertikales
 Temperaturprofil
 Wassergehalt, Temperatur,
 elektr. Leitfähigkeit (WLT)
 Feldmasse (LYS)

Abbildung 22 Feld FI.1, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

**Feldnummer: FI.2**

Abmessungen: 3,50 x 1,00 m
 Besonnung: Sonnig
 Bepflanzung: 29 Pflanzen
 6x ALT, 4x GIL, 9x KAU,
 2x KER, 8x PRA
 Bewässerung: Alle 4 Tage
 Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
 Dachabflussmenge (LYS)
 Vertikales Temperaturpr.
 Wassergehalt, Temperatur,
 elektr. Leitfähigkeit (WLT)
 Feldmasse (Lysimeter)

Abbildung 23 Feld FI.2, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

**Feldnummer: FI.3**

Abmessungen: 3,50 x 1,00 m

Besonnung: Sonnig

Bepflanzung: 29 Pflanzen

6x ALT, 4x GIL, 9x KAU,

2x KER, 8x PRA

Bewässerung: alle 8 Tage

Messungen: Dachabflussmenge (CTD)

Dachabflussmenge (LYS)

Vertikales Temperaturpr.

Wassergehalt, Temperatur,

elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Feldmasse (Lysimeter)

Abbildung 24 Feld FI.3, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

**Feldnummer: FI.4 - Referenzfeld**

Abmessungen: 3,50 x 1,00 m

Besonnung: Sonnig

Bepflanzung: Kies (+ Bodendecker)

Bewässerung: keine

Messungen: Dachabflussmenge (CTD)

Vertikales Temperaturpr.

Wassergehalt, Temperatur,

elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 25 Feld FI.4, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

**Feldnummer: FI.5**

Abmessungen: 3,50 x 1,00 m

Besonnung: Sonnig

Bepflanzung: 29 Pflanzen

6x ALT, 4x GIL, 9x KAU,

2x KER, 8x PRA

Bewässerung: alle 4 Tage

Messungen: Dachabflussmenge (CTD)

Vertikales Temperaturpr.

Wassergehalt, Temperatur,

elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 26 Feld FI.5, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

**Feldnummer: FI.6**

Abmessungen: 3,50 x 1,00 m

Besonnung: Sonnig

Bepflanzung: 29 Pflanzen

6x ALT, 4x GIL, 9x KAU,

2x KER, 8x PRA

Bewässerung: Alle 8 Tage

Messungen: Dachabflussmenge (CTD)

Vertikales Temperaturpr.

Wassergehalt, Temperatur,

elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 27 Feld FI.6, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin


Feldnummer: FII.1 - Referenzfeld

Abmessungen: 1,88 x 1,88 m
 Besonnung: Halbschattig
 Bepflanzung: Kiesdach
 Bewässerung: keine
 Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
 Wassergehalt, Temperatur,
 elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 28 Feld FII.1, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin


Feldnummer: FII.2

Abmessungen: 1,88 x 1,88 m
 Besonnung: Halbschattig
 Bepflanzung: 29 Pflanzen
 6x ALT, 4x GIL, 10x KAU,
 2x KER, 7x PRA
 Bewässerung: Alle 8 Tage
 Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
 Wassergehalt, Temperatur,
 elektr. Leitfähigkeit (WLT)
 Wasserqualität (ASM)

Abbildung 29 Feld FII.2, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin


Feldnummer: FII.3

Abmessungen: 1,88 x 1,88 m
 Besonnung: Halbschattig
 Bepflanzung: 29 Pflanzen
 6x ALT, 4x GIL, 10x KAU,
 2x KER, 7x PRA
 Bewässerung: alle 4 Tage
 Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
 Wassergehalt, Temperatur,
 elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 30 Feld FII.3, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

**Feldnummer: FII.4**

Abmessungen: 1,88 x 1,88 m
 Besonnung: Halbschattig
 Bepflanzung: 29 Pflanzen
 6x ALT, 4x GIL, 10x KAU,
 2x KER, 7x PRA
 Bewässerung: Alle 2 Tage
 Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
 Wassergehalt, Temperatur,
 elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 31 Feld FII.4, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

**Feldnummer: FII.5**

Abmessungen: 1,88 x 1,88 m
 Besonnung: Halbschattig
 Bepflanzung: 29 Pflanzen
 6x ALT, 4x GIL, 10x KAU,
 2x KER, 7x PRA
 Bewässerung: alle 8 Tage
 Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
 Wassergehalt, Temperatur,
 elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 32 Feld FII.5, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

**Feldnummer: FII.6**

Abmessungen: 1,88 x 1,88 m
 Besonnung: Halbschattig
 Bepflanzung: 29 Pflanzen
 6x ALT, 4x GIL, 10x KAU,
 2x KER, 7x PRA
 Bewässerung: Alle 4 Tage
 Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
 Wassergehalt, Temperatur,
 elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 33 Feld FII.6, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

**Feldnummer: FII.7**

Abmessungen: 1,88 x 1,88 m
 Besonnung: Halbschattig
 Bepflanzung: 29 Pflanzen
 6x ALT, 4x GIL, 10x KAU,
 2x KER, 7x PRA
 Bewässerung: alle 2 Tage
 Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
 Wassergehalt, Temperatur,
 elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 34 Feld FII.7, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

**Feldnummer: FIII.1**

Abmessungen: 3,50 x 1,00 m
 Besonnung: Schattig
 Bepflanzung: 29 Pflanzen
 7x KAU, 16x PUR,
 2x TEL, 4x VOR
 Bewässerung: Alle 8 Tage
 Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
 Wassergehalt, Temperatur,
 elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 35 Feld FIII.1, Stand Juni 2022

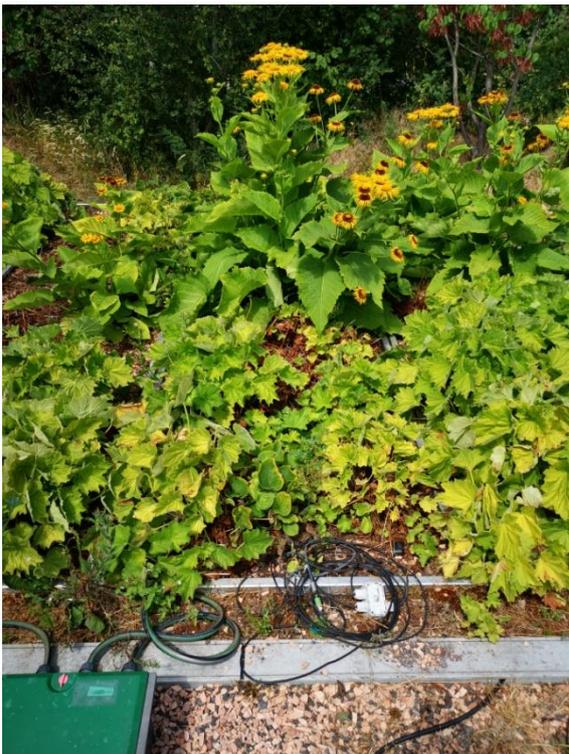
Quelle: Alexander Swirin


Feldnummer: FIII.2

Abmessungen: 3,50 x 1,00 m
 Besonnung: Schattig
 Bepflanzung: 29 Pflanzen
 7x KAU, 16x PUR,
 2x TEL, 4x VOR
 Bewässerung: alle 4 Tage
 Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
 Wassergehalt, Temperatur,
 elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 36 Feld FIII.2, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin


Feldnummer: FIII.3

Abmessungen: 3,50 x 1,00 m
 Besonnung: Schattig
 Bepflanzung: 29 Pflanzen
 7x KAU, 16x PUR,
 2x TEL, 4x VOR
 Bewässerung: Alle 2 Tage
 Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
 Wassergehalt, Temperatur,
 elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 37 Feld FIII.3, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

**Feldnummer: FIII.4**

Abmessungen: 3,50 x 1,00 m

Besonnung: Schattig

Bepflanzung: 29 Pflanzen

7x KAU, 16x PUR,

2x TEL, 4x VOR

Bewässerung: alle 8 Tage

Messungen: Dachabflussmenge (CTD)

Wassergehalt, Temperatur,

elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 38 Feld FIII.4, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

**Feldnummer: FIII.5**

Abmessungen: 3,50 x 1,00 m

Besonnung: Schattig

Bepflanzung: 29 Pflanzen

7x KAU, 16x PUR,

2x TEL, 4x VOR

Bewässerung: Alle 4 Tage

Messungen: Dachabflussmenge (CTD)

Wassergehalt, Temperatur,

elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 39 Feld FIII.5, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin


Feldnummer: FIII.6

Abmessungen: 3,50 x 1,00 m

Besonnung: Schattig

Bepflanzung: 29 Pflanzen
7x KAU, 16x PUR,
2x TEL, 4x VOR

Bewässerung: alle 2 Tage

Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
Wassergehalt, Temperatur,
elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 40 Feld FIII.6, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin


Feldnummer: FIII.7

Abmessungen: 3,50 x 1,00 m

Besonnung: Schattig

Bepflanzung: 29 Pflanzen
7x KAU, 16x PUR,
2x TEL, 4x VOR

Bewässerung: Alle 4 Tage

Messungen: Dachabflussmenge (CTD)
Wassergehalt, Temperatur,
elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 41 Feld FIII.7, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

**Feldnummer: FIII.8 - Referenzfeld**

Abmessungen:	3,50 x 1,00 m
Besonnung:	Schattig
Bepflanzung:	Kiesdach (+ Bodendecker)
Bewässerung:	keine
Messungen:	Dachabflussmenge (CTD) Wassergehalt, Temperatur, elektr. Leitfähigkeit (WLT)

Abbildung 42 Feld FIII.8, Stand Juni 2022

Quelle: Alexander Swirin

3.6 SENSORIK

Für die Messungen in den Testfeldern werden verschiedene Sensoren verwendet. Deren nachfolgend aufgeführte Eigenschaften stammen aus den Angebotstexten der Auftragnehmer. In der untenstehenden Übersicht sind die Lagen der Sensoren im Wasserkreislauf der Gründach-Testflächen schematisch dargestellt.

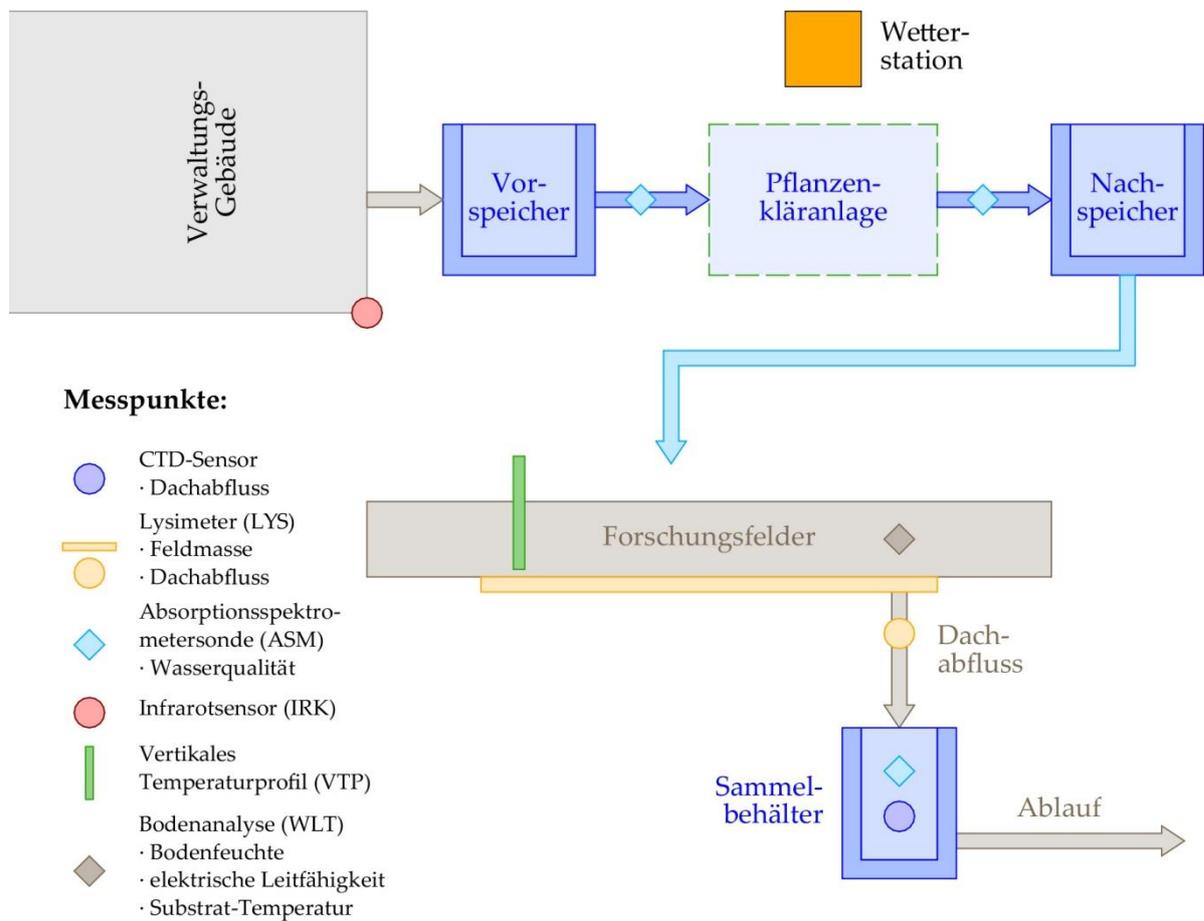


Abbildung 43 Messstrecken-Schema

Quelle: Philipp Hänicke

3.6.1 Feldsensoren

Dachsubstrat

Im Dachsubstrat der Testfelder werden punktweise Wassergehalt, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur, sowie vertikale Temperaturprofile gemessen. Dabei werden die ersten drei Messwerte von einem Kombinationsmessgerät erfasst. Die Temperaturlanze misst die Temperatur an 10 Messpunkten (Pos. 1 bis 10; dabei ist Pos. 1 unten) im Abstand von 3 cm, dabei sind die ersten 6 Messpunkte im Substrat; die restlichen oberhalb.

Kombinationssonden (WLT)

Hersteller	Stevens Water Monitoring Systems		
Produkt	hydra probe		
Menge	21 Stück		
Messwert	Wassergehalt	Elektr. Leitfähigkeit	Temperatur
Messbereich	0 bis 100 % Sättigung	0 bis 10 uS/cm	-10 bis 60°C
Auflösung	0,1 % Wassergehalt	0,01 uS/cm	0,1 K 10s
Genauigkeit	5 % vom Messwert	2 % vom Messwert	5 % vom Messwert



Abbildung 44 Kombinationssonde hydra probe von Stevens Water Monitoring Systems
Quelle: <https://stevenswater.com/products/hydraprobe>, abgerufen am 08.05.2022

Tabelle 11 Herstellerangaben Kombinationssonden

Vertikale Temperaturprofilsonden (VTP)

Hersteller	UIT GmbH Dresden
Produkt	Temperaturlanze-10T
Menge	6 Stück
Messlänge	30 cm
Messabstand	3 cm (≙ 10 Temperaturfühler)
Messwert	Temperatur
Messbereich	-10 bis 60°C
Auflösung	0,1 K
Genauigkeit	0,1 K



Abbildung 45 Temperaturlanze 10T der UIT Dresden GmbH
Quelle https://www.uit-gmbh.de/files_db/1627465172_7755_22.jpg, abgerufen am 08.05.2022

Tabelle 12 Herstellerangaben Vertikale Temperaturprofilsonden

Wasserqualität

An zwei Punkte in Nachbehälter der Grauwasser-Nutzungsanlage und in einem CTD-Sonden-Sammelbehälter wird die Wasserqualität ständig kontrolliert. Dafür werden drei optische Absorptionsspektrometersonden verwendet.

Absorptionsspektrometersonde (ASM)

Hersteller	Go Systemelektronik
Produkt	ISA-UV/VIS
Menge	3 Stück
Messbereich	UV VIS Spektren
Auflösung	256 Pixel
Messprinzip	Spektralanalysator
Messintervall	Mind. 10 Sekunden
Lichtquelle	Xenon Blitzlampe



Abbildung 46 ISA-UV/VIS von Go Systemelektronik
Quelle: <https://www.go-sys.de/bilder/1440/57ed2060b1d65.png>, abgerufen am 08.05.2022

Tabelle 13 Herstellerdaten Absorptionsspektrometersonde

Dachlysimeter

Drei Testfelder (FI.1, FI.2, FI.3) sind als Lysimeter ausgestaltet. Diese erfassen Masse und Abfluss der Felder.

Lysimeter (LYS)

Hersteller	UIT GmbH Dresden	
Produkt	Wägezelle B 10N	
Menge	1 Stück (bestehend aus 4 Wägezellen)	
Messwert	Gesamtmasse	Abflussmenge (Fallrohr DN 50)
Messbereich	500 bis 1.500 kg	0 bis 10 l/min
Auflösung	0,1 kg	0,1 l/min 10s
Genauigkeit	0,02 % vom Messwert	5% vom Messwert

Tabelle 14 Herstellerangaben Lysimeter

Bauklimatische Messwerte

Für die Ermittlung der Luftfeuchte- und Temperaturprofile an den Bauteiloberflächen werden Kombisensoren für Luftfeuchte- und Temperaturmessung verwendet, je nach Einsatzort in Bauart für Außen- oder Innenbereich. Zudem wird der Wärmefluss mittels Wärmeflussplatten in sechs Testfeldern ermittelt.

	Luftfeuchte- & Temperatursensor außen (LTA)		Luftfeuchte- & Temperatursensor innen (LTI)	
Hersteller	UIT GmbH Dresden			
Produkt	rH-A-LORA		rH-I-LORA	
Menge	6 Stück		10 Stück	
Messwert	Luftfeuchte	Temperatur	Luftfeuchte	Temperatur
Messbereich	0 bis 100 % rel. Feuchte	-25 bis 80°C	0 bis 100 % rel. Feuchte	-25 bis 80°C
Auflösung	0,1 % rel. Feuchte	0,04 °C	0,1 % rel. Feuchte	0,04 °C
Genauigkeit	2 % rel. Feuchte	0,2 °C	2 % rel. Feuchte	0,5 °C

Tabelle 15 Herstellerangaben LF-/Temp.-Sensor Bauteile außen & innen

Wärmeflussplatten (WFP)	
Hersteller	Hukseflux
Produkt	HFP01
Menge	6 Stück
Messwert	Wärmestromdichte
Messbereich	-2.000 bis 2.000 W/m ²
Sensitivität	50 μ V/(W/m ²)
Genauigkeit	3 % vom Messwert



Abbildung 47 Wärmeflussplatte GFP01 von Hukseflux

Quelle: <https://www.hukseflux.com/uploads/styles/small/public/product/HFP01-heatflux-plate-1webXLv1201.jpg>, abgerufen am 08.05.2022

Tabelle 16 Herstellerangaben Wärmeflussplatten

Dachabfluss

Der Dachabfluss wird in allen 21 Testfeldern indirekt über den Wasserstand in einem Sammelbehälter, in welchem das abfließende Wasser vorgehalten wird, gemessen. Dazu werden die elektrische Leitfähigkeit und Temperatur in dem Sammelbehälter gemessen. Der Sammelbehälter hat einen Durchmesser von 200 mm und eine Höhe von 800 mm. Auf der Höhe von 100 mm befindet sich ein Auslass 2 x 25 mm.

CTD-Sonden (CTD)			
Hersteller	UIT GmbH Dresden		
Produkt	CTD-40mm		
Menge	21 Stück		
Durchmesser	38 mm		
			<p>Abbildung 48 CTD-40mm der UIT Dresden GmbH Quelle: https://www.uit-gmbh.de/files_db/1626268980_2479__22.jpg, abgerufen am 08.05.2022</p>
Messwert	Abflussmenge	Elektr. Leitfähigkeit	Temperatur
Messbereich	0 bis 1 mWs	0 bis 2000 uS/cm	-10 bis 45°C
Auflösung	0,5 mmWs	1 uS/cm	0,1 K
Genauigkeit	1 mmWs	0,5 %	0,2 K

Tabelle 17 Herstellerdaten CTD-Sonden

Infrarotkamera

Am Gebäude über den Testfeldern ist eine Infrarotkamera installiert. Diese nimmt in regelmäßigen Abständen Wärmebilder von den Testfeldern auf, die danach auf

Infrarotkamera (IRK)	
Hersteller	InfraTec GmbH
Produkt	VarioCAM HD research 980 S Modell 2019
	Normalobjektiv 30 mm
	Weitwinkelobjektiv 15 mm
Menge	1 Stück
Messwert	Temperatur
Messbereich	-40 bis 1.200°C
Auflösung	0,02 K
Genauigkeit	1 K oder 1 % vom Messwert



Abbildung 49 Wärmebildkamera VarioCAM HD research 980S von InfraTec
 Quelle: <https://www.infratec.de/thermografie/waermebildkameras/variocam-hd-research-900/>, abgerufen am 08.05.2022

Tabelle 18 Herstellerangaben Infrarotkamera

3.6.2 Wetterstation

Die meteorologische Messstation ermittelt folgende Kennwerte: Luftfeuchte, Temperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Net-Radiation, Niederschlag. Dafür werden verschiedene Sensoren oder Kombisensoren verwendet.

Luft	Luftfeuchte- & Temperatursensor (LTW)		Luftdrucksensor (LDW)
Hersteller	GallTEC		Sensortechnics
Produkt	KPC 1/6-ME		LD-Sensor
Menge	1 Stück		1 Stück
Messwert	Luftfeuchte	Temperatur	Luftdruck
Messbereich	0 bis 100 % rel. Feuchte	-30 bis 70°C	800 bis 1100 mbar
Auflösung	0,1 % rel. Feuchte	0,1 K	1 mbar
Genauigkeit	2 % rel. Feuchte	0,2 K	0,2 % vom Messwert
Einstellzeit	5 min	5 min	-



Abbildung 50 GallTEC KPC 1/6-ME
Quelle: https://www.galltec-mela.de/footage/800x0_allrounders-pc-me.jpg, abgerufen am 08.05.2022

Tabelle 19 Herstellerangaben LF/Temp.-Sensor & Luftdrucksensor Wetterstation

Niederschlagssensor Wetterstation (NSW)	
Hersteller	Young
Produkt	Model 52202
Menge	1 Stück
Fläche	200 qcm
Messwert	Niederschlagsmenge
Messbereich	<i>keine Angabe</i>
Auflösung	0,1 mm
Genauigkeit	2% vom Messwert (bis 25 mm/h)
	3% vom Messwert (bis 50 mm/h)



Abbildung 51 Niederschlagssensor Young 52202 ME
Quelle: https://shop.profec-ventus.com/images/product_images/original_images/precipitations-sensor-you2_t5_265_0.jpg, abgerufen am 08.05.2022

Tabelle 20 Herstellerangaben Niederschlagsmesser

Wind	Windgeschwindigkeitssensor (WGW)	Windrichtungsgeber (WRW)
Hersteller	Thies Clima	
Produkt	Thies Windgeber compact	Thies Windrichtungsgeber compact
Menge	1 Stück	1 Stück
Messwert	Windgeschwindigkeit	Windrichtung
Messbereich	0,5 bis 50 m/s	0 bis 360°
Auflösung	0,1 m/s	0,4°
Genauigkeit	1 % vom Messwert	2°
	 <p>Abbildung 52 Thies Windgeber compact Quelle: https://www.thiesclima.com/db/imgz/4.3518.00.000.png, abgerufen am 08.05.2022</p>	 <p>Abbildung 53 Thies Windrichtungsgeber compact Quelle: https://www.thiesclima.com/db/imgz/4.3128.xx.000.png, abgerufen am 08.05.2022</p>

Tabelle 21 Herstellerangaben Windgeschwindigkeitssensor & Windrichtungsgeber

4-Komponenten Net-Radiometer Wetterstation (NRM)		
Hersteller	Hukseflux	
Produkt	NR01	
Menge	1 Stück	
Messbereich	0 bis 2.000 W/qm	
Temperatur-sensor	PT 100	
Messwert	Pyranometer (PAW)	Pyrgeometer (PGW)
Messbereich	Spektral: 305 bis 3.000 nm	Spektral: 4.500 bis 40.000 nm
Genauigkeit	-	-
	 <p>Abbildung 54 Net-Radiometer Hukseflux NR01 Quelle: https://www.hukseflux.com/uploads/styles/small/public/product/NR01-net-radiometer-5webXLv1201.jpg, abgerufen am 08.05.2022</p>	

Tabelle 22 Herstellerangaben Net-Radiometer

3.6.3 Messsensorenübersicht

Bezeichnung	Anzahl	Messwert	Einheit	Messbereich (von bis)		Auflösung*	Genauigkeit*	Lage
CTD	21	Abfluss	mWs	0	1	0,0005	0,001	Am Abfluss an jedem Test- feld
		Elektr. Leitföh.	uS/cm	0	2.000	1	0,5%	
		Temperatur	°C	-10	45	0,1	0,2	
ASM	3	Wasserqual.	-	UV VIS		256 Pixel	-	2x Kläranlage 1x an CTD
WLT	21	Wassergehalt	%Sätt.	0	100	0,1	5%	In jedem Testfeld
		Elektr. Leitföh.	uS/cm	0	10	0,01	2%	
		Temperatur	°C	-10	60	0,1	5%	
VTP	6	Temperatur	°C	-10	60	0,1	0,1	Alle Felder FI
LYS	1	Masse	kg	500	1.500	0,1	0,02%	Felder FI.1 bis FI.3
		Abfluss	l/min	0	10	0,1	5%	
LTA	6	Luftfeuchte	rel.LF	0	100	0,1	2	
		Temperatur	°C	-25	80	0,04	0,2	
LTI	10	Luftfeuchte	rel.LF	0	100	0,1	2	
		Temperatur	°C	-25	80	0,04	0,5	
WFP	6	Wärmestrom	W/m ²	-2.000	2.000	-	5%	
LTW	1	Luftfeuchte	rel.LF	0	100	0,1	2	
		Temperatur	°C	-30	70	0,1	0,2	
LDW	1	Luftdruck	mbar	800	1.100	1	0,2%	Wetterstation an der Pflan- zen- Kläranlage
WGW	1	Windgeschw.	m/s	0,5	50	0,1	1%	
WRW	1	Windrichtung	°	0	360	0,4	2	
NRM	1	Sonnenstrahl.	nm	305	3.000	-	-	
		Geostrahlung	nm	4.500	40.000	-	-	
NSW	1	Niederschlag	mm	-	-	0,1	2%/3%	
IRK	1	Infrarot	°C	-40	1.200	0,02	1/1%	Über Eingang

*wenn mit % angegeben, dann in % relativ zum Messwert; sonst in absolutem Wert entsprechend Einheit

Tabelle 23 Messsensorenübersicht

3.7 SOFTWARE

3.7.1 Web-Applikation

Die Messdaten werden nicht direkt von den einzelnen Sensoren abgerufen. Stattdessen sind die Sensoren vernetzt, sodass die Messdaten direkt in einer auf dem Server des Botanischen Gartens Dresden befindlichen Datenbank abgelegt werden.

Auf diesem Server läuft die Anwendung „Grafana“. Die zugehörige Dokumentation lässt sich unter <https://grafana.com/docs> einsehen. Diese Anwendung besitzt eine Web-Applikation, die es den Nutzern ermöglicht, von überall auf die Messdaten zuzugreifen. Grafana ermöglicht es den Nutzern, aus den Rohdaten der Messreihen Diagramme zu erstellen, sog. Dashboards. Alle Projektbeteiligten besitzen einen personalisierten und Passwortgeschützten Zugriff auf die Anwendung und können eigene Dashboards mit entsprechenden Diagrammen erstellen. Zudem können in den Dashboards statistische Kennwerte wie Minima, Maxima, Mittelwerte, Summen ausgegeben werden, sowie Berechnungen mit den Messwerten durchgeführt werden.

Da eine Einarbeitung in die Programmierung des Skripts zu zeitaufwendig wäre, wird auf die Datenreihen der bereits von anderen Nutzern angelegten Grafen zurückgegriffen. Von diesen Grafen ist es möglich, die zugrundeliegenden Datenreihen eines benutzerdefinierten Zeitraumes als CSV-Dateien herunterzuladen.

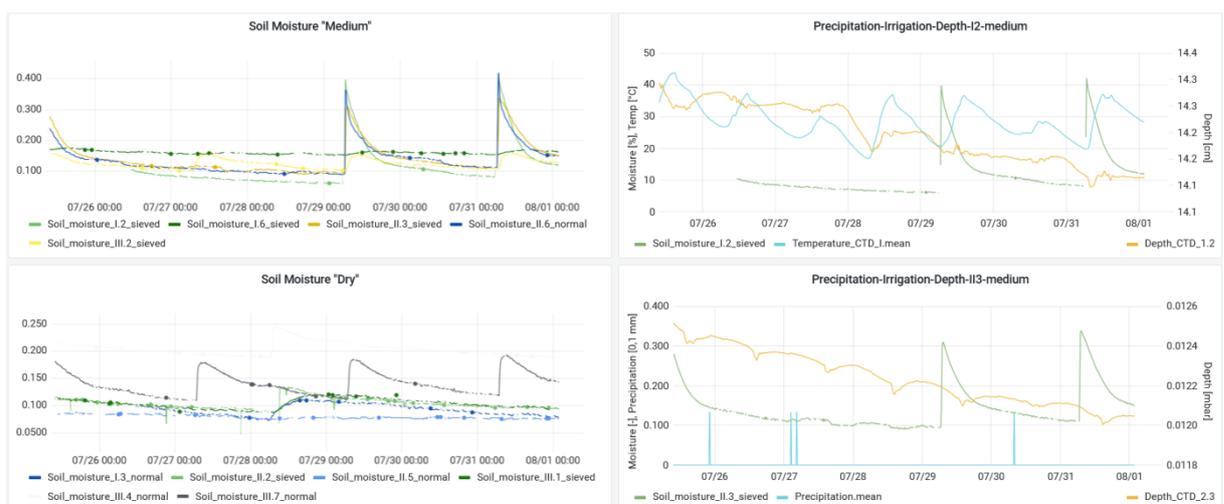


Abbildung 55 Grafen in der Web-Oberfläche von Grafana

Quelle: Peggy Freudenberg

3.7.2 Microsoft Office Excel

Zur Auswertung wird auf die Tabellensoftware Office Excel der Firma Microsoft zurückgegriffen. Diese bietet aufgrund einer leicht verständlichen und nutzerfreundlichen Benutzeroberfläche die Möglichkeit, ohne große Einarbeitungszeit eine grafische Darstellung der Messreihen zu visualisieren. Nachteilig ist lediglich, dass bei großen Datenmengen eine starke Zunahme der Rechendauer zu verzeichnen ist, welche teilweise eine effiziente Arbeitsweise konterkarieren kann.

Zudem ist teilweise eine Umwandlung der Messreihen aus Grafana, welche im englischen Zahlenformat vorliegen, in das von Microsoft Office Excel verwendete deutsche Zahlenformat nötig, welche manuell vorgenommen werden muss.

3.7.3 Skript-basierte Auswertung

Weitreichendere Möglichkeiten zur effizienten Auswertung bietet eine Skript-basierte Auswertung, bei der die Daten direkt mittels Python-Skript ausgewertet und visualisiert werden. Dabei können auch größere Datenmengen effizient verarbeitet werden, da die Berechnung nicht über eine grafische Benutzeroberfläche, sondern mittels mathematischen Rechenalgorithmen erfolgt.

Da eine Einarbeitung in eine Programmiersprache zur Skript-basierten Auswertung allerdings sehr zeitaufwendig wäre, wird davon für die ersten Messdatenauswertungen abgesehen und stattdessen auf die Tabellenkalkulation Microsoft Office Excel zurückgegriffen. Es ist allerdings geplant, zukünftige Auswertung von weiteren Messdaten via Skript zu realisieren, um auch größere Datenmengen effizient und noch detaillierter auswerten zu können.

3.8 BERECHNUNGEN

3.8.1 Feuchtebilanzierung

Mittels Feuchtebilanzierung soll berechnet werden, welche Menge an Wasser via Evapotranspiration, d.h. über die Verdunstung von den Blattoberflächen der Pflanzen an die Umgebungsluft abgegeben wird. Diese Betrachtung ist Grundlage für die quantitative Beschreibung des Kühlpotentials des Gründaches.

Als Grundlage wird der Eintrag auf das Gründach der Forschungsfelder betrachtet. Dazu wird die Feuchtebilanz für Gründächer verwendet (vgl. Cascone u. a. 2018, 5) und angepasst durch Hinzufügen des Eintrages durch künstliche Bewässerung.

$$N + B = \Delta F + D + ETP$$

Formel 1 Feuchtebilanz
Quelle: (Cascone u. a. 2018, 5 Form. 1)

N ... Niederschlagsmasse [mm]

B ... Bewässerungsmasse [l/m²]

ΔF ... Änderung der Bodenfeuchte [l/m²]

D ... Dachabfluss [l/m²]

ETP ... Evapotranspiration (Verdunstung) [l/m²]

Auf das Dach wird Wasser in Form von Regenwasser eingetragen, welches sich als Niederschlagsmenge messen lässt. Zudem wird das Dach künstlich bewässert, dessen Menge dem Dach elektronisch gesteuert zugeführt wird.

Ein Teil des Wassers versickert im Boden und wird dort gespeichert, wodurch die Bodenfeuchte ansteigt. Sinkt die Bodenfeuchte, so wird Wasser vom Boden wieder abgegeben. Ein weiterer Teil des Wassers fließt über den Dachablauf wieder vom Dach ab. Die Differenz aus Zu- und Abfluss sowie Speicherverhalten verdunstet über die Pflanzenoberfläche.

Mittels dieser Betrachtung lässt sich die Formel nach der Evapotranspirationsmasse umstellen:

$$ETP = N + B - \Delta F - D$$

Formel 2 Ermittlung Evapotranspiration
aus Feuchtebilanz

3.8.2 Bilanzierungsfunktionen

In einem weiteren Schritt soll zunächst die Abhängigkeit der Verdunstung von der Bodenfeuchte untersucht werden. Ziel soll es sein, eine allgemeingültige Formel zur Berechnung der Verdunstungskapazität von Gründächern mit einfacher Intensivbegrünung zu ermitteln. Für die Ermittlung der Evapotranspirationsmassen von Pflanzen existieren bereits verschiedene Formeln, die aber nicht spezifisch für einfach intensiv begrünte Dächer optimiert sind. Als Grundlage dienen die folgenden Formeln: (vgl. Cascone u. a. 2018, 6f.)

- Penman (1948)
- Penman-Monteith (1965)
- Priestley and Taylor (1972)
- Hargreaves (1975)
- Hargreaves (1985)
- FAO-56 Penman-Monteith (1998)
- Allen (2003)
- Penman-Monteith ASCE (2005)

Auf Basis dieser Formeln soll eine eigene, speziell für Gründächer mit einfacher Intensivbegrünung angepasste, Formel entwickelt werden. Diese kann dann als mathematische Grundlage in das Delphin-Simulationsmodell übertragen werden, um schlussendlich eine computergestützte Modellierung derartiger Gründächer zu ermöglichen.

4 MESSDATENANALYSE

Bei der Messdatenanalyse werden zunächst die auf Grafana abrufbaren Datenreihen innerhalb eines definierten Zeitraumes hinsichtlich ihrer Plausibilität untersucht. Dies geschieht durch Prüfung auf mathematische und physikalische Fehler, sowie durch Abgleich mit teils redundanten Messdaten. Sollten Daten nicht plausibel sein, so wird versucht, diese zu korrigieren. Dies geschieht je nach Sensor und auftretendem Fehler durch Anpassungen von Kalibrierungen, Streichung von Messfehlern oder Stauchungen von Kurven.

4.1 MESSPERIODE

Der Zusammenhang zwischen klimatischen Randbedingungen und der Verdunstung soll innerhalb der Phase der Bewässerung bei möglichst unterschiedlichen Umgebungsbedingungen untersucht werden. Dazu wird zunächst einmal der sommerliche Fall mit starker Verdunstung aufgrund von hohen Temperaturen und Luftfeuchte untersucht. Für eine gute Mittelung der Werte soll die Dauer der Auswertungsperioden jeweils 2 Monate betragen, damit kleinere fehlerhafte oder fehlende Werte möglichst wenig Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Die Bewässerung beginnt nach Ende der Frostperiode im März oder April und endet kurz vor dem Ende der frostfreien Zeit Anfang Dezember. Als Sommerfall werden die Monate Juni und Juli ausgewählt, da dort die höchsten Temperaturen in Dresden im statistischen Mittel zu erwarten sind und damit der thermische Einfluss auf die Verdunstung ebenso ist. Für die Jahre 2020 und 2021 liegen bereits vollständige Datensätze vor. Für 2022 liegen nur für die ersten Monat Daten vor; weitere Daten werden fortlaufend in die Web-Oberfläche übernommen. Da sich die Bepflanzung zum Beginn des Jahres 2021 noch einmal aufgrund von Frostschäden geändert hat, wird auf die Nutzung der Messdaten von 2020 verzichtet, um später weitere Auswertungen zukünftiger Jahre mit der immer selben Bepflanzung durchführen zu können. Da die Messdaten für 2021 vollständig für das gesamte Jahr vorliegen, werden die Perioden für die Auswertung in diesem Jahr verortet. In einer zukünftigen Untersuchung sollen zudem der Winterfall betrachtet werden. Da aber im Winter selbst nicht bewässert wird, sollten dann die Monate Oktober und November gewählt werden, da dann die Temperaturen meist niedrig sind, aber eine Bewässerung noch stattfindet. Diese Betrachtung ist allerdings kein Teil dieser Analyse und Auswertung.

4.2 LOGBUCH-EINTRÄGE

Zu den Messungen gibt es ein Logbuch, in dem alle für die Messungen relevanten Störungen protokolliert werden. Aus diesen wurden nachfolgend die relevantesten Ereignisse herausgefiltert, welche für die beiden Messperioden in nachfolgenden Tabellen zusammengefasst sind. Neben diesen genannten Ereignissen werden in dem Logbuch noch weitere aufgeführt, welche aber einen kurzen und geringfügigen Einfluss haben. Da bei der Auswertung nur die Tageswerte berücksichtigt werden und dabei die Abweichung weniger Minutenwerte nur minimalen Einfluss hat, werden diese marginalen Einflüsse hier vernachlässigt.

Des Weiteren gab es von einem Projektverantwortlichen den Hinweis, dass es während des Forschungsvorhabens bereits öfter Probleme mit Verstopfung an dem Niederschlagsmesser der Wetterstation an den Forschungsfeldern gab. Ob diese in den betreffenden Messperioden ebenfalls auftraten, war allerdings nicht mehr zu ermitteln. Entsprechend sollte die Plausibilität der Niederschlagsdaten von der Wetterstation an den Forschungsfeldern geprüft werden.

Datum	Ereignis
21.06. – 29.06.2021	Ausfall Bewässerung
29.06. – 30.06.2021	Ausfall diverser Messgerät, Grund: voller Speicher
01.07.2021	Bepflanzung ehem. Kiesflächen: FI.4, FIII.8
01.07.2021	Siebe im Ablauf verstopft: FII.4, FII.7 Neue Siebe im Ablauf: FII.5, FII.6, alle Felder FIII
09.08.2021	Feststellung diverser Defekte: <ul style="list-style-type: none"> • Defekter Ablauf FII.6 • Verstopfter Ablauf FI.2 • Niederschlagsmesser Reinigung nötig
09.11. – 12.11.2021	FI.2: eventuell verstopfter Ablauf
18.11.2021	Reinigung nötig und durchgeführt: alle Ablauf-Siebe, Niederschlagsmesser
18.11.2021	Neueinbau CTD-Sensoren: <ul style="list-style-type: none"> • FI.3, FI.6 • FII.2, FII.5, FII.7 • FIII.4, FIII.6, FIII.7
24.11.2021	Einwinterung Bewässerungssystem

Tabelle 24 Auszug aus den Logbucheinträgen 2021, gefiltert

4.3 KLIMADATEN: NIEDERSCHLAG

Als Wetterdaten werden zunächst die Niederschlagswerte am Standort des Botanischen Gartens Dresden benötigt, damit die Daten möglichst genau die auf den Forschungsfeldern auftretende Niederschlagsmenge repräsentieren können. Vorzugweise sollen dazu die Klimadaten von der eigens für das Forschungsprojekt errichteten Wetterstation über der Pflanzenkläranlage verwendet werden. Alternativ steht etwa 100 Meter entfernt eine weitere Wetterstation auf dem Gelände des Botanischen Gartens Dresden, die vom Umweltamt der Stadt Dresden betrieben wird. Als Vergleich zur Prüfung der Plausibilität werden die Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes von der Messstation Dresden-Klotzsche am Flughafen Dresden herangezogen.

Juni & Juli 2021			
	N_BF	RR_FH	RR_BOT
Standort	An den Forschungsfeldern	Dresden-Klotzsche	Botanischer Garten
Statistische Kennwerte			
Physikalische Einheit	l/m ²	l/m ²	l/m ²
Niederschlagssumme	117,60	256,30	167,04
Mittelwert	0,00	4,20	0,02
Min	0,00	0,00	0,00
Max	3,90	56,20	6,61
Stand.-abw.	0,02	9,26	0,18
Anzahl	87840	61	8784
Intervall	1 min	1 d	10 min
Vollständigkeit der Messwerte			
Fehlwerte	0	0	0
	0,00%	0,00%	0,00%
Plausibilität: Summe Niederschlag			
Juni 2021	58,80	127,60	86,34
Juli 2021	58,80	128,70	80,70
gesamt	117,60	256,30	167,04

Tabelle 25 Statistische Kennwerte der Niederschlagsmesser Juni & Juli 2021

4.3.1 Wetterstation Dresden-Klotzsche

Die Wetterstation Dresden-Klotzsche des Deutschen Wetterdienstes (DWD) dient als Vergleichsmessung für die Klimadaten. Die Daten von dieser Messstation wurden vom Deutschen Wetterdienst geprüft und sind öffentlich frei abrufbar. (DWD 2021) Für den gesamten betrachteten Zeitraum werden die tageweisen Werte genutzt. Dabei liegen die Messwertdaten vollständig ohne Messausfälle vor. Da diese geprüft wurden, können diese als zuverlässig betrachtet werden.

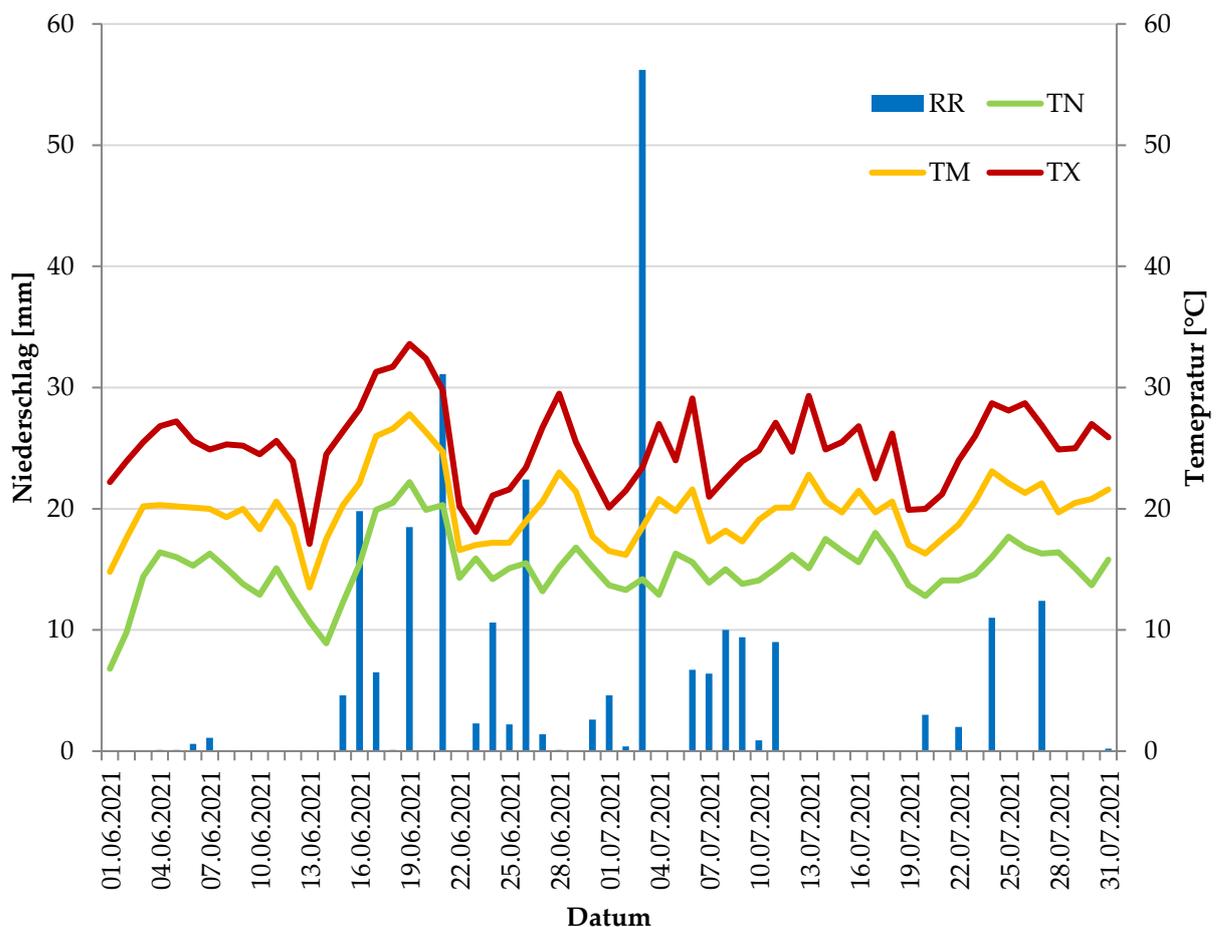


Diagramm 1 Klimadiagramm Wetterstation Dresden-Klotzsche

Aufgrund der Entfernung von etwa 8 Kilometern Luftlinie zwischen der Messstation des DWD in Dresden-Klotzsche und den Forschungsfeldern im Botanischen Garten Dresden sind die DWD-Wetterdaten nur bedingt nutzbar. Verstärkt wird dieser Effekt zusätzlich durch die exponierte Lage der Messstation in Dresden-Klotzsche im Vergleich zur Talkessel-lage des Botanischen Gartens.

4.3.2 Wetterstation an den Forschungsfeldern

Von den Wetterdaten wird für die Feuchtebilanzierung der Niederschlag benötigt. Dieser wird auch direkt an den Forschungsfeldern an der Messstation oberhalb der Pflanzenkläranlage gemessen. Die Messwerte werden dort im Zeitintervall von 1 Minute erfasst, sodass für den Messzeitraum im Sommer 87.840 Messwerte vorliegen. Diese sind vollständig ohne Fehlwerte. Die physikalische Einheit ist laut Herstellern mit [mm^{Niederschlag}] angegeben, was der Einheit [l/m²] entspricht.

Bereits an den statistischen Kennwerten und den Niederschlagssummen lässt sich eine deutliche Abweichung der Messungen an den Forschungsfelder (N_BF) im Vergleich zu den Daten des Deutschen Wetterdienstes konstatieren. Eine Abweichung ist zwar aufgrund unterschiedlicher lokaler Wetterverhältnisse gegeben, muss aber geprüft werden.

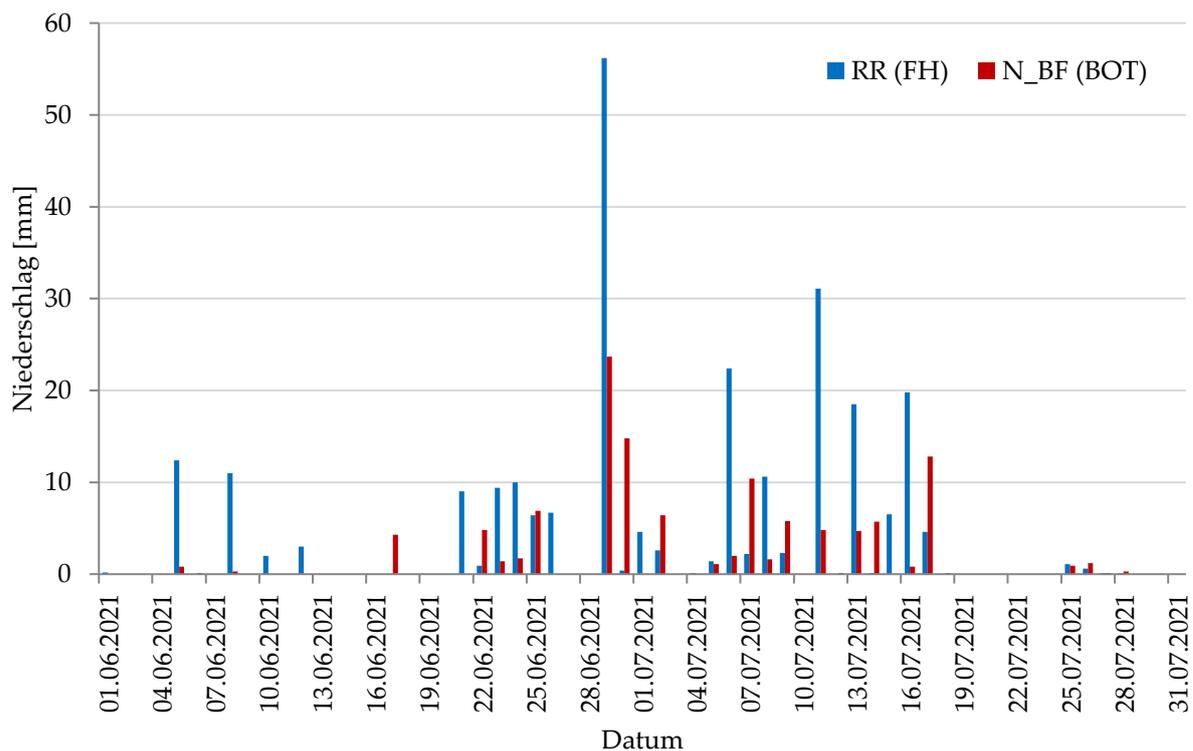


Diagramm 2 Niederschlagswerte an den Forschungsfeldern und in Dresden-Klotzsche

Im Tagesvergleich der Messungen zeigen sich deutliche Unterschiede. Selbst an starken Regentagen, wie z.B. am 29.06.2021, wurde in Dresden-Klotzsche mehr als das Doppelte an Niederschlag gemessen. Diese Feststellung deckt sich auch mit der Summe der Kennwerte: Die Niederschlagssummen sind am Flughafen mehr als doppelt so hoch wie an der Messstation an den Forschungsfeldern, sowohl im Juni als auch im Juli.

Summenangleichung

Zunächst wurde vermutet, dass es sich um eine fehlerhafte Umrechnung der Rohdaten handelt. Dies bedeutet, dass zwischen den Rohdaten vom Sensor und den tatsächlichen Niederschlagsdaten eine lineare Abhängigkeit bestünde. Um dies zu überprüfen, wurden die Messwerte mit einem Faktor multipliziert, sodass am Ende die Gesamtsumme über den Messzeitraum der Niederschlagssumme der Messstation Dresden-Klotzsche entspricht.

$$\text{Faktor } a = \frac{\text{Niederschlagssumme Dresden – Klotzsche}}{\text{Niederschlagssumme Wetterstation Forschungsfelder}}$$

Formel 3 Summengleichung Niederschlag

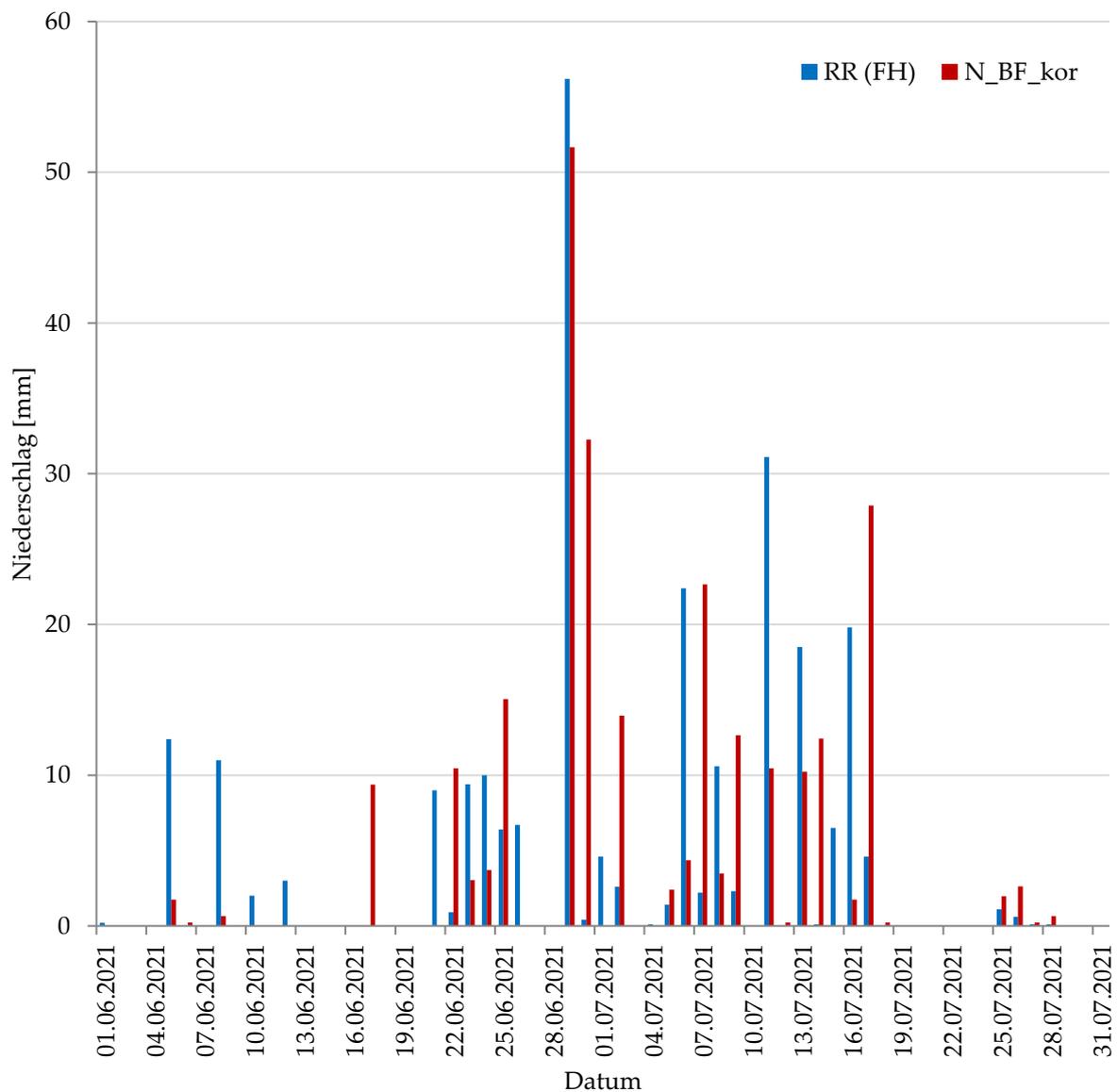


Diagramm 3 Niederschlagssummen nach Summenangleichung

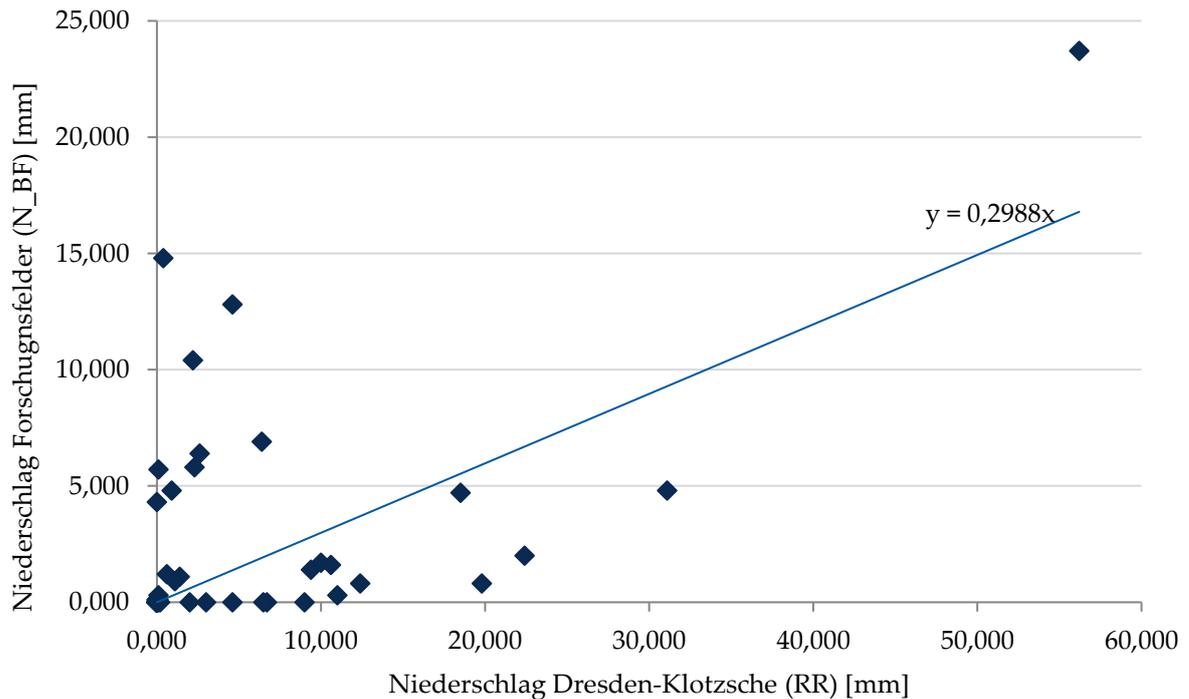


Diagramm 4 Vergleichsdiagramm Niederschläge Dresden-Klotzsche

Aber auch nach der Summenangleichung zeigen sich starke Unterschiede. Besonders auffällig sind die Tage, an denen an der einen Messstation ein Niederschlag gemessen wurde, an der anderen aber gar keiner. Besonders deutlich werden die Abweichungen im Vergleichsdiagramm, in welchem starke Abweichungen von der Trendlinie zu verzeichnen sind. Dies ist vermutlich tatsächlich auf die lokale Abweichung der Standorte zurückzuführen, sodass die Messdaten aus Dresden-Klotzsche nicht zur Plausibilitätsprüfung der Niederschlagsdaten an den Forschungsfeldern genutzt werden können.

Allerdings können die Daten der Wetterstation Dresden-Klotzsche für eine Plausibilitätsprüfung der Feuchtebilanzierung genutzt werden. Die Messdaten der Wetterstation an den Forschungsfeldern hingegen muss mit den Messdaten der Wetterstation im Botanischen Garten abgeglichen werden.

Die im Logbuch und in Mitteilungen der Projektverantwortlichen aufgeführten Probleme mit Verstopfungen am Niederschlagsmesser könnten Abweichungen erklären. Gleichzeitig wäre es aber genauso möglich, dass der Niederschlagsmesser zumindest teilweise im Regenschatten der Bäume oder des Verwaltungsgebäudes steht, wodurch geringere Niederschlagsmengen verzeichnet werden als tatsächlich gefallen sind.

4.3.3 Wetterstation im Botanischen Garten

Bei der Wetterstation im Botanischen Garten Dresden handelt es sich um eine temporäre Messstation, die in Kooperation des Umweltamtes der Stadt Dresden mit dem Deutschen Wetterdienst betrieben wird. Es liegen vollständige Werte für das gesamte Jahr 2021 vor. Da die Daten vom Deutschen Wetterdienst erfasst und teilweise geprüft wurden, ist die Zuverlässigkeit der Daten gegeben.

Anhand der Messwerte wird sichtbar, dass ein hoher Unterschied zwischen den Klimadaten in Dresden-Klotzsche und am Botanischen Garten besteht, was die These des lokal doch stark abweichenden Wetters bestätigt. Vergleicht man die Niederschläge der beiden Messungen am Botanischen Garten und direkt an den Forschungsfeldern, ist an vielen Tagen eine deutliche Annäherung der Messwerte zu sehen. Nur an wenigen Tagen weichen die Messwerte voneinander ab. Lediglich zwei Tageswerte an der Wetterstation an den Forschungsfeldern sind größer als die der Wetterstation im Botanischen Garten. Insgesamt ist die Summe der Niederschläge an der Wetterstation an den Forschungsfeldern aber deutlich geringer als die Niederschläge im Botanischen Garten.

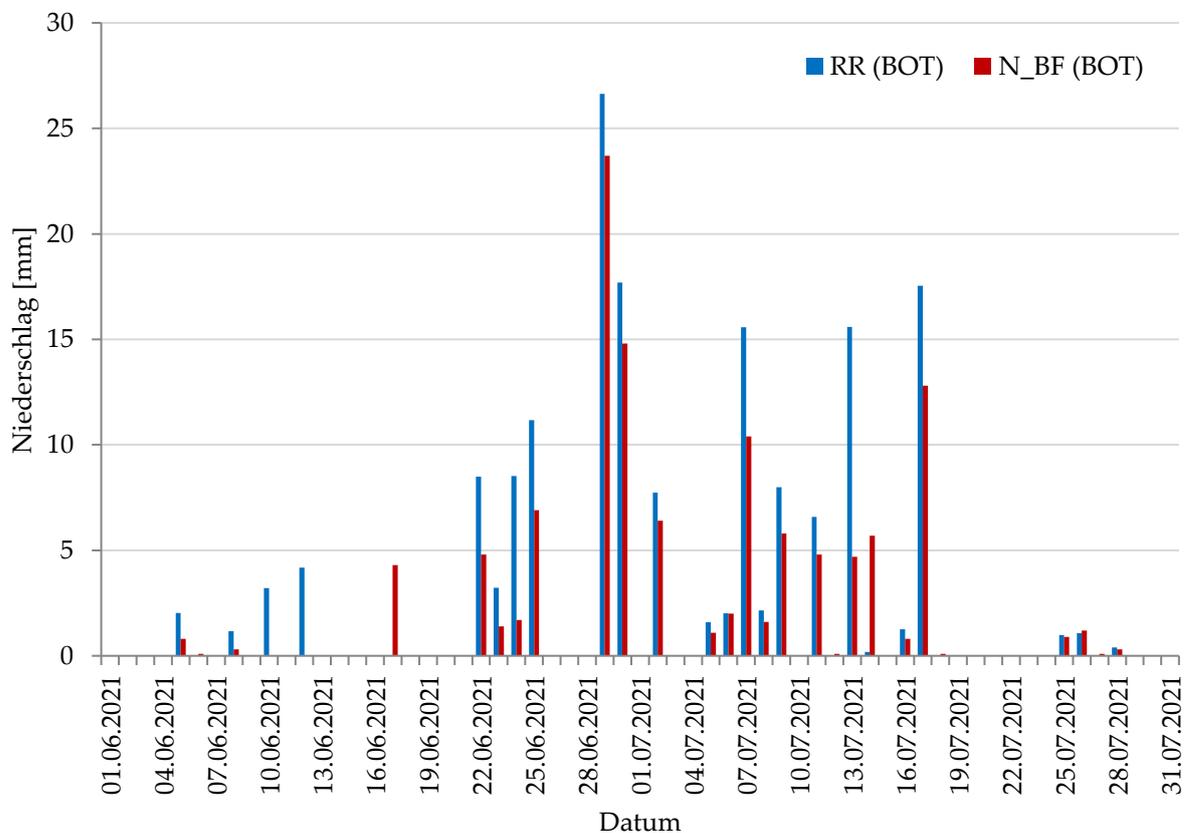


Diagramm 5 Niederschlagswerte an den Forschungsfeldern und im Botanischen Garten

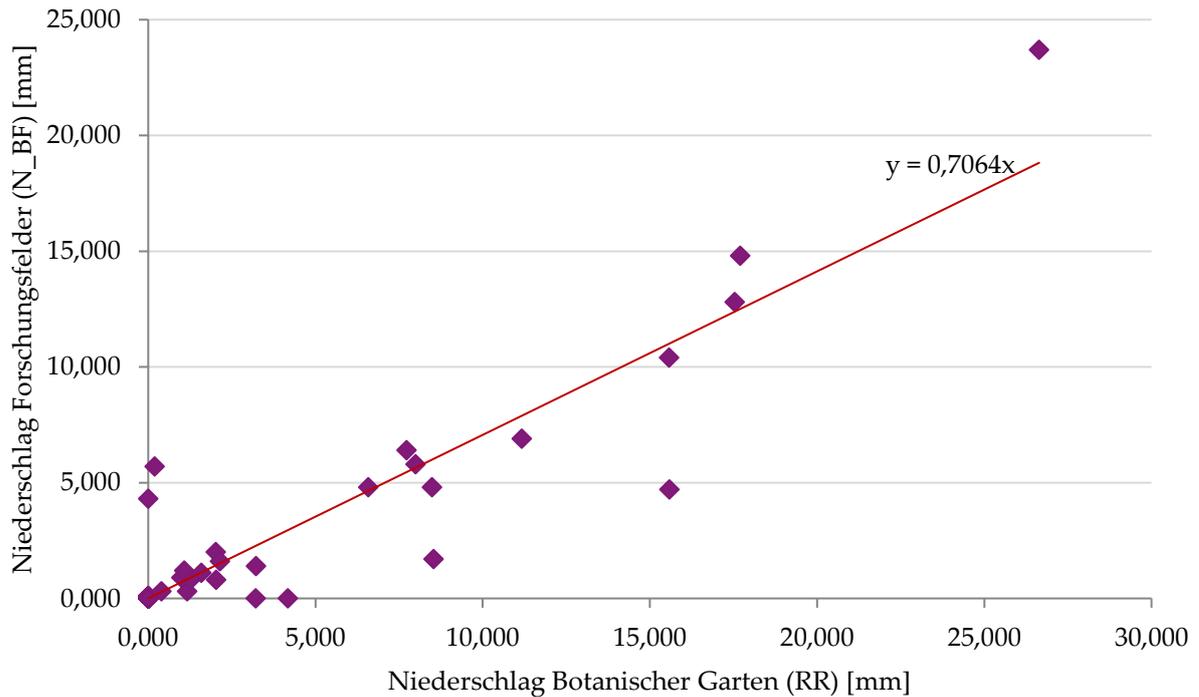


Diagramm 6 Vergleichsdiagramm Niederschläge Botanischer Garten

Aufgrund dessen, dass weiterhin signifikante Abweichungen zwischen den Messdaten der beiden genannten Stationen vorhanden sind, ist zu evaluieren, welche Daten zu nutzen sind. Die Messwerte von der Wetterstation an den Forschungsfeldern sind weder geprüft, noch kann aufgrund diverser Störungen eine dauerhafte korrekte Funktionsweise garantiert werden.

Die Messstation im Botanischen Garten befindet sich nur ca. 100 Metern von den Forschungsfeldern entfernt. Deren Daten sind vom Deutschen Wetterdienst erfasst und geprüft worden. Da das lokale Wetter auf 100 Metern Entfernung nicht zu stark abweichen sollte, wird aufgrund der Datenlage entschieden, für alle weiteren Betrachtungen die Niederschlagskennwerte von der Messstation im Botanischen Garten zu verwenden. Dies wurde zwar nur für die Messperiode Juni bis Juli 2021 analysiert, da allerdings von ähnlichen Problemen im Winter auszugehen ist oder diese zumindest nicht ausgeschlossen werden können, wird für den Zeitraum Oktober bis November 2021 ebenfalls auf die Daten der Wetterstation im Botanischen Garten Dresden zurückgegriffen.

4.4 BEWÄSSERUNG

Bei der Bewässerung bestand das Problem, dass zwar das Bewässerungsintervall für jedes Feld bekannt war, allerdings keine Messreihen existieren, die die genauen Bewässerungszeitpunkte für jedes Feld protokollieren. Somit müssen die Daten statistisch hergeleitet werden.

Dafür wird auf die Bodenfeuchte zurückgegriffen: Wird ein Feld bewässert, versickert zuallererst ein Großteil davon im Boden, sofern der Boden noch genug Wasser aufnehmen kann. Mit einer Bodenfeuchte von meist 25 bis 60% (mit nur wenigen Ausnahmen) ist dies den Großteil der Zeit gegeben. Steigt also die Bodenfeuchte innerhalb eines kurzen Zeitraumes stark an, ohne dass zeitgleich ein nennenswertes Regenereignis stattfindet, so ist davon auszugehen, dass kurz zuvor eine künstliche Bewässerung stattfand. Betrachtet man dies für alle Felder und beide Sommermonate, so ist das Ziel, ein möglichst regelmäßiges Intervall zu erkennen. Da die Auswertung der Daten nur tageweise erfolgt, ist es nicht erforderlich, den genauen Bewässerungszeitpunkt zu ermitteln. Es wurden deshalb nur die Tage festgestellt, an denen eine Bewässerung der jeweiligen Testfelder stattfand. Es ist weiterhin bekannt, dass alle Felder derselben Bewässerungsgruppe am selben Tag direkt hintereinander bewässert werden, sodass es durchaus ausreichend ist, wenn für jeden der drei Bewässerungsintervalle jeweils ein sich wiederholendes Intervall im Bodenfeuchteanstieg auffindbar ist.

Um dies zu überprüfen wurde der Anstieg der Bodenfeuchte minutengenau ermittelt. Dabei wurden nur alle Werte größer 0 herausgefiltert, da nur zunehmende Bodenfeuchte eine Rolle spielt. Besonders große Anstiege wurden hervorgehoben. Die Auswertung wurde zunächst an den Feldern FI.1 (alle 2 Tage bewässert), FI.2 (alle 4 Tage bewässert) und FI.3 (alle 8 Tage bewässert) durchgeführt. Dabei waren die Werte im Juni sehr uneindeutig; im Juli hingegen konnten tatsächlich in allen Feldern Muster erkannt werden, die auf eine Bewässerung im entsprechenden Tagesrhythmus hinweisen. Folglich konnten die in Tabelle 26 aufgeführten Bewässerungstage ermittelt werden.

Tag Feld	alle 2 d	alle 4 d	alle 8 d	Tag Feld	alle 2 d	alle 4 d	alle 8 d
01.06.2021	17,00			01.07.2021	17,00		
02.06.2021				02.07.2021		17,00	
03.06.2021	17,00			03.07.2021	17,00		
04.06.2021		17,00		04.07.2021			
05.06.2021	17,00			05.07.2021	17,00		
06.06.2021			17,00	06.07.2021		17,00	
07.06.2021	17,00			07.07.2021	17,00		
08.06.2021		17,00		08.07.2021			17,00
09.06.2021	17,00			09.07.2021	17,00		
10.06.2021				10.07.2021		17,00	
11.06.2021	17,00			11.07.2021	17,00		
12.06.2021		17,00		12.07.2021			
13.06.2021	17,00			13.07.2021	17,00		
14.06.2021			17,00	14.07.2021		17,00	
15.06.2021	17,00			15.07.2021	17,00		
16.06.2021		17,00		16.07.2021			17,00
17.06.2021	17,00			17.07.2021	17,00		
18.06.2021				18.07.2021		17,00	
19.06.2021	17,00			19.07.2021	17,00		
20.06.2021		17,00		20.07.2021			
21.06.2021	17,00			21.07.2021	17,00		
22.06.2021			17,00	22.07.2021		17,00	
23.06.2021	17,00			23.07.2021	17,00		
24.06.2021		17,00		24.07.2021			17,00
25.06.2021	17,00			25.07.2021	17,00		
26.06.2021				26.07.2021		17,00	
27.06.2021	17,00			27.07.2021	17,00		
28.06.2021		17,00		28.07.2021			
29.06.2021	17,00			29.07.2021	17,00		
30.06.2021			17,00	30.07.2021		17,00	
				31.07.2021	17,00		

Tabelle 26 Errechneter Bewässerungsplan

Zur Kontrolle wurden auch alle anderen Felder auf gleiche Art und Weise geprüft. Bei den meisten Feldern zeichnete sich ein ähnliches Bild ab. Lediglich bei einigen Feldern der Feldgruppe III war kein eindeutiges Muster im Bodenfeuchteanstieg zu erkennen. Dies könnte seine Ursache darin haben, dass diese Felder sehr sonnig sind und im Sommer auch bereits dort eine Verdunstung des aufgebrauchten Wassers stattfindet oder die Pflanzen das Wasser aufgrund der geringeren Bodenfeuchte direkt aufnehmen, sodass kein signifikanter Anstieg der Bodenfeuchte zu verzeichnen ist.

Vergleicht man zudem den minütlichen Zeitpunkt der Bodenfeuchteanstiege, so lässt sich erkennen, dass dies zumeist um ca. 20 Minuten nach 6 Uhr morgens der Fall ist. Aufgrund dessen und der Tatsache, dass die Bewässerung automatisiert stattfindet, ist davon auszugehen, dass die Bewässerung morgens um 6 Uhr startet.

Im Logbuch des Gründaches ist allerdings bezüglich der Messungen noch eine Einschränkung zu treffen: Dort ist notiert, dass die Bewässerung zwischen dem 21.06. und dem 29.06.2021 vollständig ausgefallen ist. Demzufolge wird das Muster an diesen Tagen ausgesetzt.

4.5 SENSORDATEN

4.5.1 Dachabfluss

Der Dachabfluss wird in allen Feldern von CTD-Sensoren in den Sammelbehältern erfasst. Allerdings messen die CTD-Sensoren keine Abflussmengen, sondern den Wasserstand im Sammelbehälter. Entsprechend ist eine Überführung und Interpretation aller CTD-Daten in realen Abflüsse für alle Felder notwendig. In den Feldern FI.1 bis FI.3 wird der Dachabfluss redundant als Runoff vom Lysimeter gemessen. Dadurch können die errechneten Dachabflusswerte der CTD-Sensoren mit den Messwerten der Lysimeter-Messungen abgeglichen werden.

CTD-Sensoren

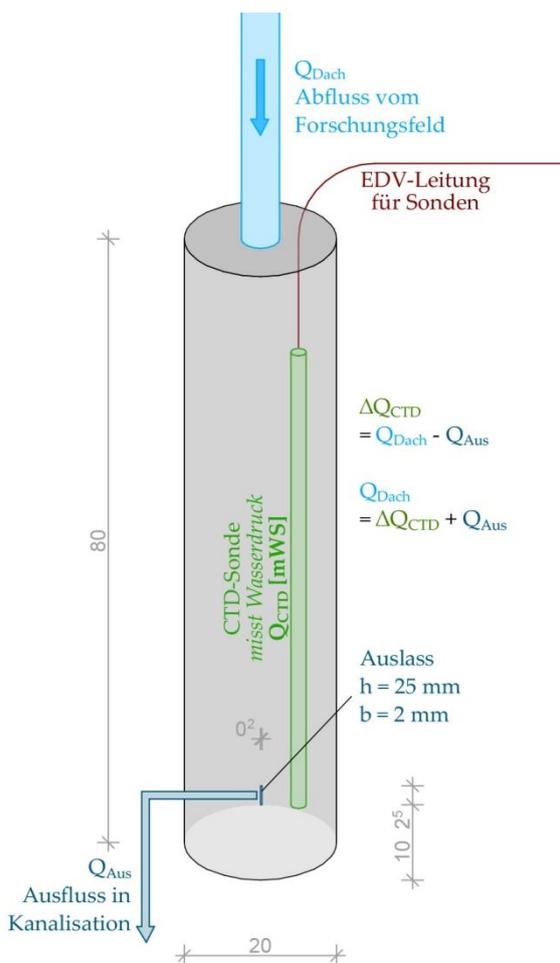


Abbildung 56 Schema CTD-Sensor
 Quelle: Philipp Hänicke

Die CTD-Sensoren messen den Wasserstand innerhalb der Sammelbehälter h_{CTD} in Meter Wassersäule (mWs). Aus den Wasserstandsänderungen je Zeiteinheit kann zusammen mit der Querschnittsfläche die Volumenänderung in dem Sammelbehälter Q_{CTD} ermittelt werden.

$$Q_{CTD} = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{\Delta h_{CTD}}{\Delta t} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \frac{\Delta h_{CTD}}{\Delta t}$$

Formel 4 Volumenänderung im Sammelbehälter

Diese Volumenänderung setzt sich wiederum zusammen aus dem Zufluss von den Forschungsfeldern, die dort über die Dachrinne abfließen, abzüglich des Ausflusses, der vom Sammelbehälter über den seitlichen Auslass 25 x 2 mm in die Kanalisation abfließt.

$$Q_{CTD} = Q_{Dach} - Q_{Aus}$$

Formel 5 Volumenbilanz Sammelbehälter

Der Ausfluss in die Kanalisation wird abhängig vom Wasserstand berechnet. Befindet sich der Wasserstand im Bereich des Auslaufschlitzes (zwischen 100 und 125 mm), wird die Schlitzwehrformel nach Poleni mit einem Abflussbeiwert von $\mu = 0,64$ verwendet. Für einen höheren Wasserstand wird die Formel zur Abflussberechnung bei rückgestautem Abfluss aus rechteckiger Seitenöffnung mit einem Abflussbeiwert von $\mu = 0,61$ verwendet. (vgl. Lohaus 2021, 75)

$$Q_{Aus} = \begin{cases} \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \cdot (h_{CTD} - h_{UK})^{\frac{3}{2}}, & h_{OK} \geq h_{CTD} > h_{UK} \\ \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \cdot ((h_{CTD} - h_{UK})^{\frac{3}{2}} - (h_{CTD} - h_{OK})^{\frac{3}{2}}), & h_{CTD} > h_{OK} \end{cases}$$

Formel 6 Schlitzwehrformel nach Poleni und rückgestauter Seitenabfluss nach Bollrich

Um den realen Dachabfluss zu ermitteln, muss der Ausfluss zu dem Messwert addiert werden. Dabei werden die einzelnen Formelteile nur berücksichtigt, wenn der Wasserstand die entsprechend Höhe aufweist.

$$D = Q_{Dach} = Q_{CTD} + Q_{Aus}$$

Formel 7 Volumenbilanz nach Dachabfluss umgestellt

$$D = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \frac{\Delta h_{CTD}}{\Delta t} + \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \cdot \left(\left(\max\left\{ \begin{matrix} 0 \\ h_{CTD} - h_{UK} \end{matrix} \right\} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\max\left\{ \begin{matrix} 0 \\ h_{CTD} - h_{OK} \end{matrix} \right\} \right)^{\frac{3}{2}} \right)$$

Formel 8 Kombinierte Dachabflussformel

Param.	Wert	Einheit	Bezeichnung
d	0,200	m	Durchmesser
μ	0,64 ($h_{CTD} \leq h_{OK}$) 0,61 ($h_{CTD} > h_{OK}$)	-	Abflussbeiwert
g	9,81	m/s^2	Erdbeschleunigung
b	0,002	m	Auslassbreite
h_{UK}	0,100	m	Unterkante Auslass
h_{OK}	0,125	m	Oberkante Auslass

Tabelle 27 Parameter für die Dachabflussberechnung

Quelle: Philipp Hänicke

In den Herstellerangaben fehlt die Angabe, ob es sich bei der Positionierung der Höhe des Auslasses um die Unterkante oder die Oberkante des Schlitzes handelt. Es wird davon ausgegangen, dass es sich um die Angabe der Unterkante handelt, da bei vergleichbaren Behältern immer diese angegeben wird.

Bei der statistischen Auswertung lässt sich zunächst feststellen, dass die Messreihen nahezu vollständig sind, da nur bis zu 12 von jeweils 732 Messwerten fehlen. Die errechneten Summen der Dachabflüsse der einzelnen Felder erscheinen auf den ersten Blick realistisch, mit 8 bis knapp 19 Litern in den Monaten Juni und Juli je Feld. Allerdings fällt bei der Prüfung der Vorzeichen der errechneten Dachabflüsse auf, dass einige errechnete Dachabflusswerte negativ sind. Dies ist nicht möglich, da das Wasser nicht vom Sammelbehälter zurück auf das Dach fließen kann. Dieser Fehler tritt in allen Messreihen auf; das Minimum liegt dabei zwischen knapp unter null und -3,14 Litern, sodass der Wert nicht vernachlässigbar klein ist. Insgesamt treten negative errechnete Dachabflüsse bei 11,61% bis zu 22,54% aller errechneten Dachabflüsse auf.

Feld	Σ [I]	\emptyset [I]	Min [I]	Max [I]	St.- Abw.	Mess- werte	Inter- vall	Fehl- werte	Fehl- werte	Negative Werte	Negative Werte
D_I.1	17,3537	0,0241	-0,1909	0,6909	0,0510	732	2 h	11	1,50%	154	21,04%
D_I.2	17,8520	0,0248	-0,1314	0,3737	0,0319	732	2 h	11	1,50%	115	15,71%
D_I.3	18,3081	0,0254	-0,1300	0,2149	0,0223	732	2 h	10	1,37%	86	11,75%
D_I.4	15,6899	0,0217	-0,0720	0,2748	0,0258	732	2 h	10	1,37%	107	14,62%
D_I.5	17,3728	0,0241	-0,0372	0,2452	0,0216	732	2 h	11	1,50%	90	12,30%
D_I.6	17,1419	0,0238	-0,0672	0,2794	0,0295	732	2 h	12	1,64%	106	14,48%
D_II.1	16,8401	0,0233	-1,1847	0,9659	0,0777	732	2 h	10	1,37%	130	17,76%
D_II.2	15,5611	0,0216	-0,2928	0,2470	0,0338	732	2 h	12	1,64%	92	12,57%
D_II.3	16,8115	0,0233	-0,1022	0,4041	0,0360	732	2 h	9	1,23%	126	17,21%
D_II.4	17,2406	0,0239	-0,1300	0,6918	0,0402	732	2 h	12	1,64%	109	14,89%
D_II.5	18,3490	0,0254	-0,4847	0,6865	0,0505	732	2 h	9	1,23%	143	19,54%
D_II.6	14,4517	0,0200	-0,1651	0,3709	0,0359	732	2 h	11	1,50%	111	15,16%
D_II.7	17,9218	0,0249	-0,2874	0,4037	0,0318	732	2 h	11	1,50%	108	14,75%
D_III.1	8,4867	0,0118	-0,2659	0,3983	0,0356	732	2 h	11	1,50%	85	11,61%
D_III.2	8,5568	0,0119	-0,1999	0,4943	0,0386	732	2 h	11	1,50%	103	14,07%
D_III.3	13,0160	0,0181	-0,3827	0,6894	0,0674	732	2 h	11	1,50%	153	20,90%
D_III.4	17,1638	0,0238	-0,0700	0,4344	0,0320	732	2 h	11	1,50%	125	17,08%
D_III.5	18,0575	0,0250	-0,1628	0,4669	0,0349	732	2 h	11	1,50%	118	16,12%
D_III.6	17,6169	0,0244	-0,1932	0,7238	0,0606	732	2 h	11	1,50%	165	22,54%
D_III.7	17,6336	0,0245	-1,1965	1,0131	0,0733	732	2 h	12	1,64%	134	18,31%
D_III.8	14,8843	0,0206	-3,1418	4,4530	0,2792	732	2 h	11	1,50%	129	17,62%

Tabelle 28 Statistische Kennwerte Dachabfluss

Quelle: Philipp Hänicke

Negative (Minimal-)Werte

Für einen Wasserstand mit einer Höhe von 125 mm wird beispielhaft der Ausfluss in dem Messintervall von 2 Stunden berechnet. Dabei ergibt sich eine Ausflussmenge von $Q_{Aus} = 0,000015 \text{ m}^3 = 0,01494095 \text{ Liter}$. Stellt man die Formel zur Volumenberechnung des Zylinders nach der Höhe um, lässt sich die Wasserstandsänderung, die nur durch den Ausfluss verursacht wird, errechnen.

$$\Delta h_{Aus} = \frac{Q_{Aus}}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Formel 9 Umgestellte Volumenbilanz
des Sammelbehälters

So ergibt sich eine Wasserstandsänderung von $\Delta h_{Aus} = 0,000475585 \text{ m} = 0,475585223 \text{ mm}$. Die maximale Auflösung des CTD-Sensors für den Wasserstand beträgt 1 mm. Damit ist die Änderung des Wasserstandes allein durch den Ausfluss innerhalb des Messintervalls von 2 Stunden nicht messbar. Aufgrund dessen zeigt die Messung einen konstanten Wasserstand trotz Ausflusses von Wasser an. Nach 2 Messintervallen beträgt der Ausfluss dann $2 \cdot \Delta h_{Aus} = 0,951170447 \text{ mm}$, nach 3 Messintervallen $3 \cdot \Delta h_{Aus} = 1,42675567 \text{ mm}$. Demzufolge wird nach mehreren Messintervallen eine Änderung des Wasserstandes von über 1 mm registriert. Die Dauer, bis diese Änderung vom Sensor registriert werden kann, variiert stark, da der Ausfluss abhängig vom Wasserstand ist und hier nur beispielhaft mit einem Wasserstand von 125 mm gerechnet wurde. Tritt die Messwertänderung von 1 mm ein, so ist an diesem Zeitpunkt allerdings die Wasserstandsabsenkung stärker als der tatsächliche berechnete Ausfluss, wenn kein Dachabfluss dazukommt ($-Q_{CTD} > Q_{Aus}$). Folglich ist der berechnete Dachabfluss negativ.

Falsch-positive und falsch-negative Dachabflüsse

In den errechneten Dachabflusswerten lassen sich so sowohl falsch-positive als auch falsch-negative Werte ablesen. Dazu wird zunächst die Zeit betrachtet, in der tatsächlich kein Dachabfluss in Realität vorhanden ist. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Im Fall, dass die Messwerte des Wasserstandes bei zwei aufeinanderfolgenden Messzeitpunkten gleich sind, ist aufgrund des errechneten Ausflusses ein errechneter Dachabfluss vorhanden. Dieser ist falsch-positiv, da er laut der Annahme Null sein müsste.

- Im anderen Fall, dass die Messwerte des Wasserstands geringer werden, was mit der Zeit durch den Ausfluss auch so ist, so wird, wie oben beschrieben, ein negativer Dachabfluss berechnet. Dieser ist falsch-negativ, da auch dieser Null sein müsste.

Steigt der Wasserstand zwischen zwei Messzeitpunkten, so muss ein Dachabfluss vorhanden sein. Damit ist dieser Fall für die Annahme des nicht vorhandenen Dachabflusses nicht zu betrachten. Im nachfolgenden Diagramm sind für die Annahme des nicht vorhandenen Dachabflusses die falsch-positiven und falsch-negativen errechneten Dachabflusswerte beispielhaft dargestellt:

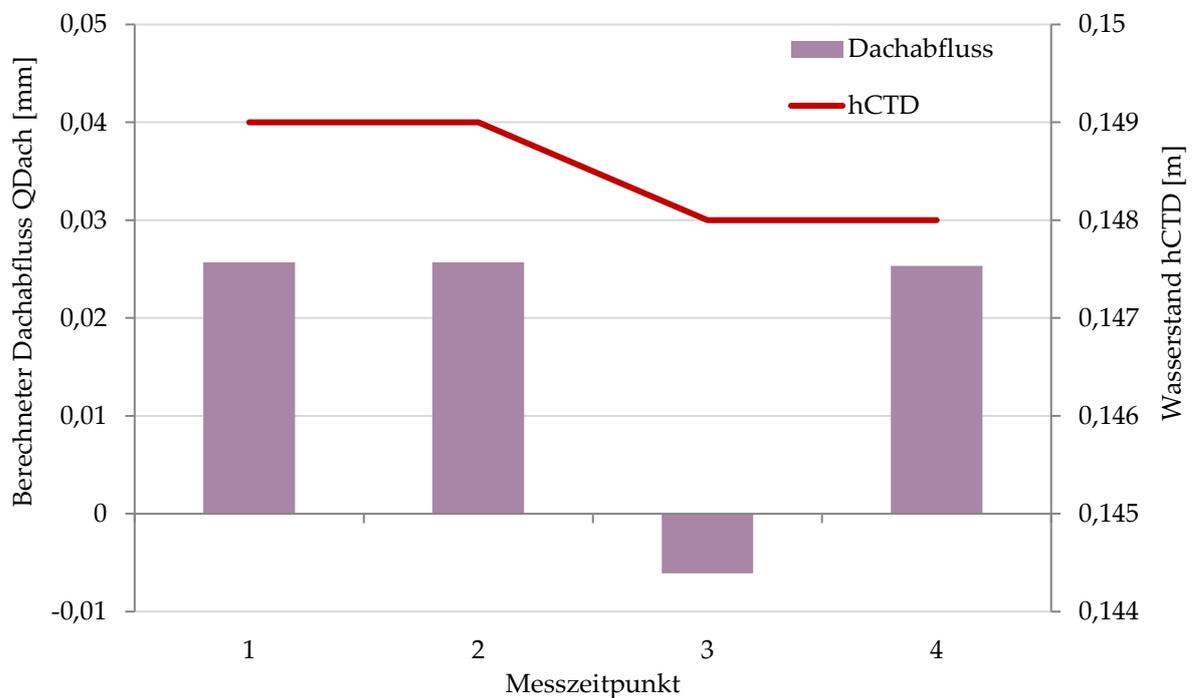


Diagramm 7 Falsch-positive und falsch-negative Messwerte
Quelle: Philipp Hänicke

Die errechneten negativen Dachabflusswerte lassen sich leicht herausfiltern, indem nur Werte größer Null betrachtet werden. Problematisch sind die falsch-positiven Dachabflusswerte, da nicht direkt erkennbar ist, ob tatsächlich ein geringer Dachabfluss vorliegt oder es sich nur um eine Messungenauigkeit aufgrund der Auflösungsbeschränkung des Sensors handelt. Solange die Wasserstandsänderung nicht messbar durch den Dachabfluss beeinflusst wird, so setzt sich der Fehler fort. Da der Dachabfluss meist nur zu Zeiten von Niederschlag auftritt, tritt besagter Messfehler sehr häufig auf.

Bereinigung der errechneten Dachabflüsse

Um die errechneten Dachabflusswerte zu bereinigen, wird zunächst versucht, die negativen errechneten Einzelwerte der Dachabflüsse herauszufiltern. Die Prüfung der Plausibilität dieser Bereinigung basiert auf der Grundannahme, dass zwar die Einzelwerte Messungenauigkeiten aufgrund der Auflösungsbeschränkung des Sensors aufweisen, aber dennoch die Summen der errechneten Dachabflüsse über den Zeitraum von zwei Monaten korrekt sein sollten. Die Ausflüsse vom Sensor treten zwar teilweise zeitversetzt auf, werden aber dennoch registriert. Dafür wurden die errechneten Dachabflüsse über den gesamten Zeitraum summiert. Dabei wurden zwei Fälle unterschieden: Zum einen wurden alle Messwerte summiert, im anderen Fall wurden nur die positiven Messwerte summiert; die negativen Messwerte wurden herausgefiltert.

	Originalwerte		ohne negative Einzelwerte			ohne negative Tageswerte		
	Min.	Σ	Σ	Differenz		Σ	Differenz	
	l	l	l	l	%	l	l	%
DI.1	-0,1909	17,3537	20,3415	2,9877	17,22%	17,6700	0,3162	1,82%
DI.2	-0,1314	17,8520	19,2580	1,4061	7,88%	17,8554	0,0034	0,02%
DI.3	-0,1300	18,3081	19,0898	0,7817	4,27%	18,3081	0,0000	0,00%
DI.4	-0,0720	15,6899	17,1067	1,4169s	9,03%	15,6899	0,0000	0,00%
DI.5	-0,0372	17,3728	18,0152	0,6423	3,70%	17,3728	0,0000	0,00%
DI.6	-0,0672	17,1419	18,4096	1,2677	7,40%	17,1419	0,0000	0,00%
DII.1	-1,1847	16,8401	21,0030	4,1629	24,72%	18,0163	1,1761	6,98%
DII.2	-0,2928	15,5611	17,6680	2,1069	13,54%	15,7184	0,1573	1,01%
DII.3	-0,1022	16,8115	18,6148	1,8032	10,73%	16,8115	0,0000	0,00%
DII.4	-0,1300	17,2406	18,8279	1,5873	9,21%	17,3334	0,0928	0,54%
DII.5	-0,4847	18,3490	20,9311	2,5821	14,07%	18,3490	0,0000	0,00%
DII.6	-0,1651	14,4517	17,0750	2,6233	18,15%	14,5744	0,1227	0,85%
DII.7	-0,2874	17,9218	19,1615	1,2397	6,92%	17,9218	0,0000	0,00%
DIII.1	-0,2659	8,4867	10,9933	2,5066	29,54%	8,6740	0,1874	2,21%
DIII.2	-0,1999	8,5568	11,7211	3,1643	36,98%	8,9335	0,3767	4,40%
DIII.3	-0,3827	13,0160	18,1725	5,1565	39,62%	13,7295	0,7134	5,48%
DIII.4	-0,0700	17,1638	18,3680	1,2042	7,02%	17,1638	0,0000	0,00%
DIII.5	-0,1628	18,0575	19,4746	1,4171	7,85%	18,0575	0,0000	0,00%
DIII.6	-0,1932	17,6169	21,5716	3,9548	22,45%	17,8658	0,2489	1,41%
DIII.7	-1,1965	17,6336	20,6982	3,0646	17,38%	17,6996	0,0660	0,37%
DIII.8	-3,1418	14,8843	24,5901	9,7059	65,21%	18,8587	3,9744	26,70%

Tabelle 29 Errechneter Dachabfluss mit und ohne Messwertfilterung

Quelle: Philipp Hänicke

Bis auf wenige Ausnahmen ist in allen Feldern eine Abweichung von teils bis zu 65% von der Summe der Originalwerte zu verzeichnen, was bedeutet, dass durch die Filterung der negativen Werte die Summe der errechneten Dachabflüsse um 65% höher ist. Damit ist eine Filterung der negativen Einzelwerte aufgrund der großen Abweichung nicht repräsentativ. Eine derart große Abweichung kann in diesem Feld zudem auf das Vorliegen von anderen Messfehlern oder Fehlfunktionen des Sensors hindeuten.

In einer zweiten Untersuchung werden stattdessen die negativen Werte weiter mit berücksichtigt. In der tageweisen (summierten) Betrachtung der errechneten Dachabflüsse ergeben sich dabei teilweise negative Werte, die allerdings zumeist gering ausfallen. Um eine Filterung dieser Werte zu quantifizieren wurde auch die Summe der Tageswerte für die drei Felder ohne Berücksichtigung negativer Tageswerte erstellt indem an den Tagen mit negativem Dachabfluss der Wert auf null gesetzt wurde. Dabei zeigt sich, dass in allen drei Feldern die Summe ohne negative Tageswerte nur marginal von der Originalsumme abweicht: Lediglich in fünf Feldern ist die Abweichung über 2%, davon in 2 Feldern etwas über 5%. Stark abweichend ist Feld FIII.8 mit einer Abweichung der Summe der bereinigten Tageswerte von 26,70% von den summierten Originalwerten. Dabei handelt es sich allerdings um ein Referenzfeld mit Kiesbedachung, sodass ein Ausfall dieses Feldes nicht weiter problematisch ist.

Generell ist eine Abweichung von unter 2% akzeptabel, aber auch die Abweichung bis 7% sollte in diesem Fall statistisch vertretbar sein. Aufgrund dessen werden für die weiteren Berechnungen die gefilterten Tageswerte verwendet.

Prüfung auf Plausibilität

Beispielhaft wird der tageweise Dachabfluss für die Felder FI.1 bis FI.3 ermittelt. In dem unten stehenden Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass nahezu täglich in allen drei Feldern ein Dachabfluss vorhanden ist, unabhängig davon, ob an dem Tag Niederschlag oder künstliche Bewässerung vorhanden sind oder nicht. Dies ist nicht plausibel, da für den Fall, dass kein Wasser zugeführt wird, eigentlich auch kein Dachabfluss vorhanden sein sollte. Ursächlich für den errechneten Dachabfluss sind zwei Faktoren: Zum einen wird bei konstantem Wasserstand im Sammelbehälter angenommen, dass Wasser vom Dach kontinuierlich in den Behälter fließen muss, da als Grundannahme davon ausgegangen wird, dass über den seitlichen Schlitz kontinuierlich Wasser aus selbigem Behälter abfließt. Diese Grundannahme, ob dem tatsächlich auch so ist und dieser Ausfluss tatsächlich vorhanden ist, sollte überprüft und die Berechnung des Dachabflusses entsprechend korrigiert werden. Da diesbezüglich aber keine genaueren Angaben vorliegen, ist dies zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich und sollte in zukünftigen Betrachtungen Beachtung finden. Zum anderen sind auch an den Tagen ohne Niederschlag und ohne Bewässerung des entsprechenden Feldes teilweise Erhöhungen des Wasserstandes im Sammelbehälter zu verzeichnen. Diese könnten ihre Ursache in Messungenauigkeiten von dem Sensor oder durch minimale Wasserstandsänderungen während der Messung durch z.B. Erschütterungen aufgrund Schwerlastverkehrs auf der direkt angrenzenden Hauptstraße sein.

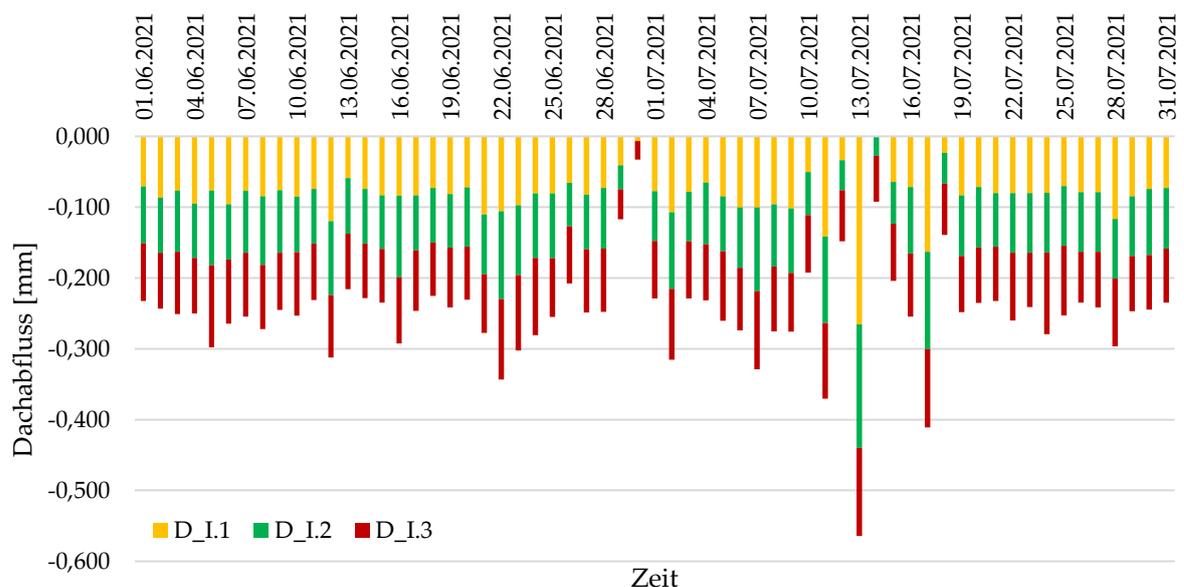


Diagramm 8 Korrigierter Dachabfluss Felder FI.1 bis FI.3

Quelle: Philipp Hänicke

Redundanz: Lysimeter-Runoff

Um die Daten der CTD-Sensoren zu prüfen, kann auf redundant erfasste Daten der Lysimeter in den Feldern FI.1 bis FI.3 zurückgegriffen werden. Die physikalische Einheit der Messdaten des Lysimeter-Runoffs ist [40 ml]. Um diese in [l/m²] umrechnen zu können, müssen der Faktor zur Einheitenumrechnung, sowie die Fläche des Forschungsfeldes berücksichtigt werden.

$$R_{real} = R_{mess} [40 \text{ ml}] \cdot \frac{40 \text{ [ml]}}{1 \text{ [40 ml]}} \cdot \frac{1 \text{ [l]}}{1.000 \text{ [ml]}} \cdot \frac{1}{3,50 \text{ [m}^2\text{]}} = \frac{2}{175} \cdot R_{mess}$$

Formel 10 Umrechnung Lysimeter-Runoff

Der Faktor, mit dem die Messwerte multipliziert werden, beträgt 2/175. Nach der Umrechnung können die ermittelten Dachabflüsse von Lysimeter-Runoff und CTD-Sensor miteinander verglichen werden.

	R_I.1	R_I.2	R_I.3	D_I.1	D_I.2	D_I.3
Minimum	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	0,03
Maximum	0,007	0,006	0,006			
Summe	6,422	6,460	5,625	5,049	5,102	5,231
Alle Angaben in [l/m ²]						

Tabelle 30 Vergleich errechneter Dachabflüsse
Quelle: Philipp Hänicke

Die Summen der Dachabflüsse über den gesamten Betrachtungszeitraum sind ähnlich groß, sodass die Summen der CTD-Sensoren als plausibel angesehen werden können. Allerdings fällt bei der Diagramm-Auswertung auf, dass sich die zeitliche Verteilung der Dachabflüsse stark unterscheidet. Es fällt auf, dass die Messdaten nur an ausgewählten Tagen Dachabflüsse aufzeigen, was plausibler als ein nahezu konstanter täglicher Dachabfluss ist.

An einigen Tagen ist ein geringer Abfluss trotz hohen Niederschlags ermittelt worden. Dies kann damit begründet werden, dass bei Wind aus Südwest bis Nord das Gebäude einen Regenschatten auf die Felder der Feldgruppe I werfen könnte, sodass dann nur wenig Niederschlag auf den Feldern ankommt. Um dies zu prüfen, wurden die Tage im Diagramm grün hinterlegt (WR), an denen Wind wehte und dieser mindestens die Hälfte des Tages aus Südwest bis Nord (Windrichtung 225° bis 360°) kam. Es ist im Diagramm erkennbar, dass

tatsächlich an den fraglichen Tagen ein Windschatten vorliegen haben könnte, sodass diese Fälle plausibel sind.

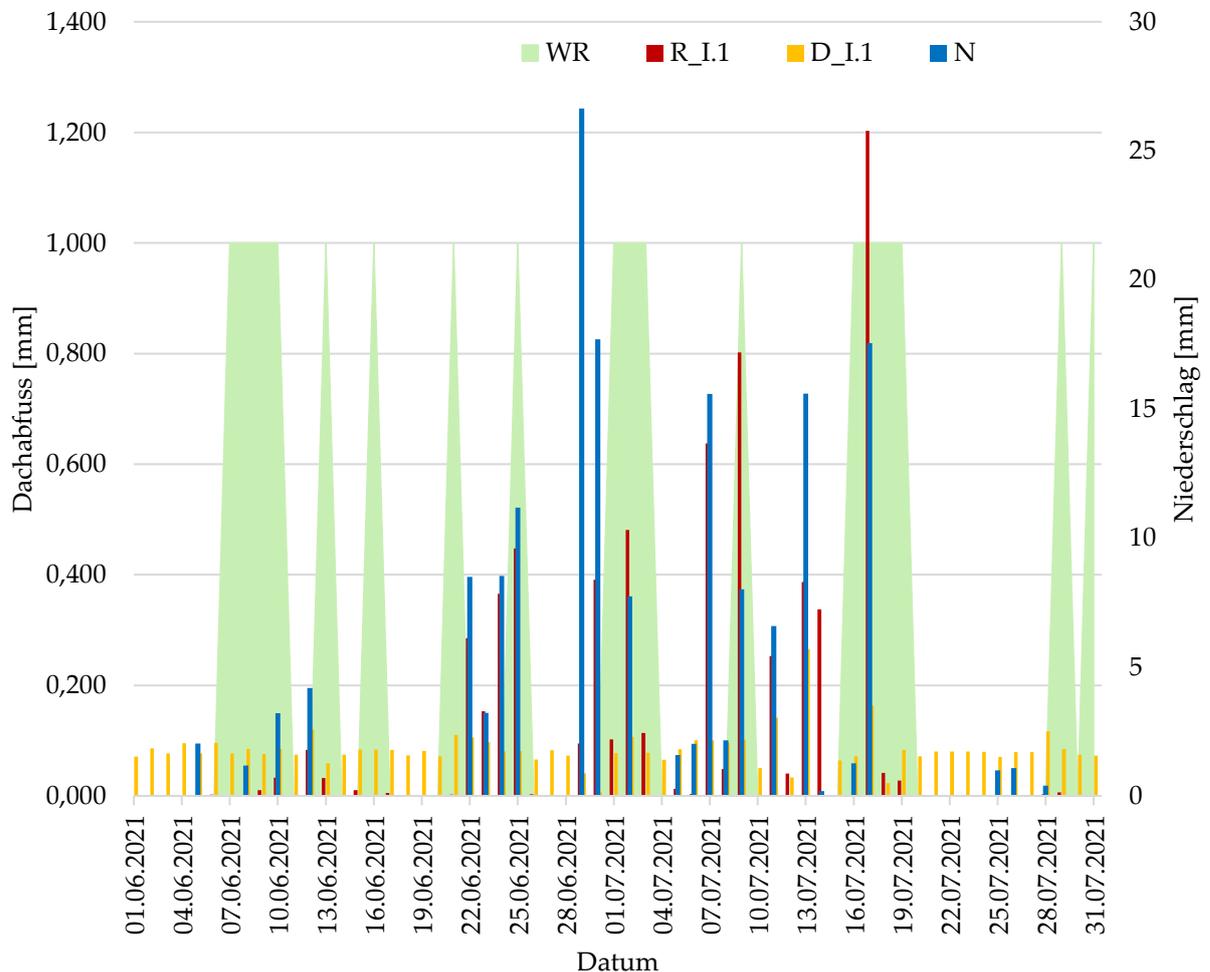


Diagramm 9 Vergleich CTD-Dachabfluss und Lysimeter-Runoff
Quelle: Philipp Hänicke

Aufgrund der höheren Plausibilität der zeitlichen Verteilung der Dachabflüsse werden die Lysimeter-Runoff-Daten für die Felder FI.1 bis FI.3 für die Feuchtebilanzierung verwendet. Für alle anderen Felder kann leider mangels redundanter Messungen keine weitere Prüfung der Daten vorgenommen werden. Daher sind für jene Felder die Daten der CTD-Sensoren zu eingeschränkt zu verwenden. Dabei ist zu beachten, dass deren Summen plausibel sind, deren zeitliche Verteilung hingegen nicht. In zukünftigen Betrachtungen sollten die CTD-Sensor-Daten aller übrigen Felder ebenfalls durch redundante Messungen geprüft werden, um eine validierte Feuchtebilanzierung zu ermöglichen.

4.5.2 Wägung

Bereits im Zwischenbericht sind erhebliche Messartefakte untereinander und im Tagesgang verzeichnet worden. (vgl. Lohaus 2021, 26) In der Auswertung des Jahresbeginns 2022 wurde festgestellt, dass das Gewicht der drei gemessenen Felder nach 6 Monaten um teilweise bis zu 200 kg reduziert war, was als nicht plausibel angesehen wird. Aufgrund der genannten Feststellungen sind die Daten derzeit nur eingeschränkt nutzbar. Für den Zeitraum Juni 2021 bis Dezember 2021 konnten derartig starke Schwankungen nicht verzeichnet werden, sodass diese für diesen Zeitraum nutzbar sind. Im Tagesverlauf ist zudem eine regelmäßige Gewichtsveränderung zu erkennen: Die Felder werden morgens, kurz nach Sonnenaufgang, leichter, was auf eine Austrocknung durch die Solarstrahlung zurückzuführen sein könnte. Allerdings werden sie abends bis nachts wieder schwerer, was nicht trivial zu erklären ist. Ursächlich könnte möglicherweise eine Zunahme des Luftdrucks in der Nacht sein. Generell treten viele kleine Gewichtsveränderungen im Tagesverlauf auf, die nur tagsüber und auch immer nur kurzzeitig auftreten. Dies könnte darin begründet sein, dass direkt neben dem Botanischen Garten die Stübelallee verläuft. Diese Hauptverkehrsachse wird sowohl von Straßenbahnen, als auch von Schwerlastverkehr befahren, was zu Schwingungen führt, die das hochsensible Wägungssystem stören können. Die Daten der Wägung selbst werden nicht für die Berechnung der Feuchtebilanzierung benötigt. Allerdings kann aus der Gewichtsänderung die Änderung der Bodenfeuchte ermittelt werden, sodass die Gewichtsmessung als redundante Messung für die Felder FI.1 bis FI.3 genutzt wird.

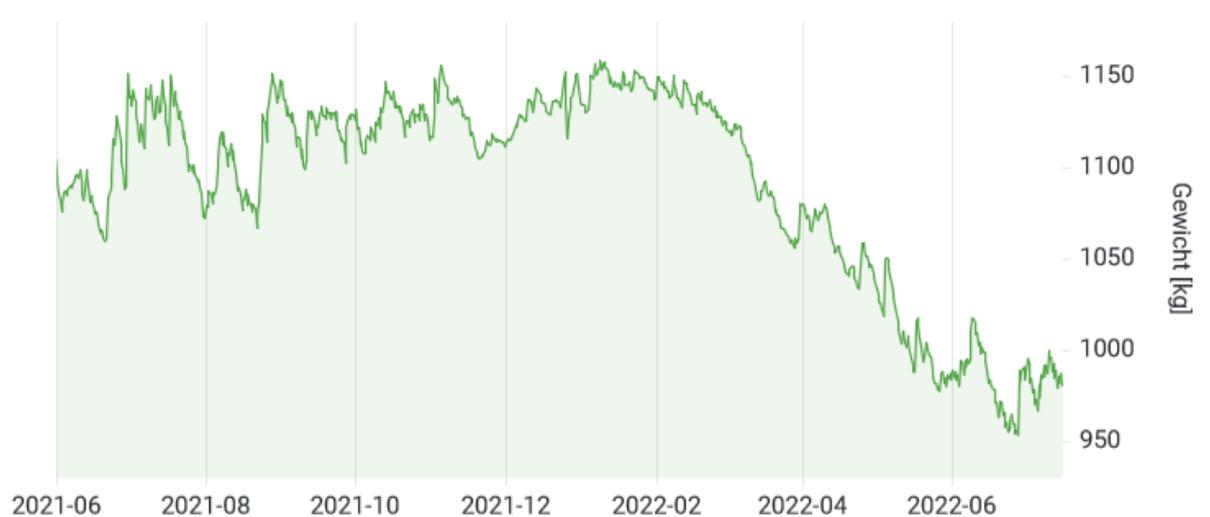


Diagramm 10 Gewicht Feld FI.1 im Jahresverlauf

Quelle: Peggy Freudenberg

4.5.3 Bodenfeuchte

Zunächst wurde bei den Messwerten für die Bodenfeuchte festgestellt, dass neben Fehlwerten auch einige Nullwerte vorhanden sind, die nicht plausibel erscheinen, da es sich um einzelne Minutenwerte handelt. Aufgrund dessen wurden diese Nullwerte für die weitere Betrachtung herausgefiltert. In der folgenden Tabelle sind die statistischen Kennwerte für die Bodenfeuchte aufgeführt. Diese reichen von 9 Vol% bis hin zu 95 Vol% gemessener Bodenfeuchte.

Feld	Ø [Vol%]	Min [Vol%]	Max [Vol%]	St.-Abw.	Mess- werte	Intervall	Fehlwerte	
F_I.1	0,37	0,20	0,59	0,08	87840	1 min	3	0,00%
F_I.2	0,30	0,14	0,53	0,08	87840	1 min	8	0,01%
F_I.3	0,25	0,15	0,55	0,06	87840	1 min	2	0,00%
F_I.4	0,23	0,09	0,50	0,11	87840	1 min	3	0,00%
F_I.5	0,32	0,18	0,49	0,05	87840	1 min	44	0,05%
F_I.6	0,36	0,21	0,62	0,09	87840	1 min	7	0,00%
F_II.1	0,01	0,01	0,01	0,00	87840	1 min	87839	100,00%
F_II.2	0,43	0,13	0,95	0,15	87840	1 min	15	0,01%
F_II.3	0,35	0,16	0,61	0,08	87840	1 min	4	0,00%
F_II.4	0,34	0,20	0,56	0,07	87840	1 min	10	0,01%
F_II.5	0,25	0,09	0,37	0,07	87840	1 min	8	0,00%
F_II.6	0,31	0,14	0,60	0,07	87840	1 min	5	0,00%
F_II.7	0,42	0,26	0,63	0,07	87840	1 min	8	0,00%
F_III.1	0,34	0,18	0,55	0,07	87840	1 min	5	0,00%
F_III.2	0,35	0,22	0,52	0,06	87840	1 min	5	0,00%
F_III.3	0,34	0,23	0,52	0,05	87840	1 min	5	0,00%
F_III.4	0,34	0,23	0,54	0,05	87840	1 min	6	0,00%
F_III.5	0,00	0,00	0,00	0,00	87840	1 min	87840	100,00%
F_III.6	0,37	0,20	0,44	0,04	87840	1 min	19	0,02%
F_III.7	0,33	0,13	0,54	0,09	87840	1 min	9	0,00%
F_III.8	0,27	0,09	0,61	0,12	87840	1 min	9	0,00%

Tabelle 31 Statistische Kennwerte Bodenfeuchte

Quelle: Philipp Hänicke

Bei der statistischen Auswertung der gemessenen Bodenfeuchte lassen sich bereits einige Fehler feststellen:

- Die Felder FII.1 und FIII.5 weisen keine Messwerte auf.

Diese Felder sind deshalb nicht für die Auswertung zu verwenden.

- Die maximale Bodenfeuchte liegt je nach Feld bei bis zu 95 Vol%.

Laut Hersteller wird nur eine max. Bodenfeuchte von ca. 35 Vol% erreicht. Die Werte erscheinen nicht plausibel und sind zu korrigieren.

- Die minimale Bodenfeuchte liegt teilweise bei 9 Vol%.

Der Welkepunkt liegt bei Gründachsubstraten im Normalfall bei ca. 20 Vol%. Eine derart geringe Bodenfeuchtwäre zwar möglich, würde aber auf Dauer zum Vertrocknen der Pflanzen führen. Phänotypisch sind die Pflanzen aber in hohem Wuchs. Deshalb sind die Werte zu prüfen.

Problem der lokalen Feuchte

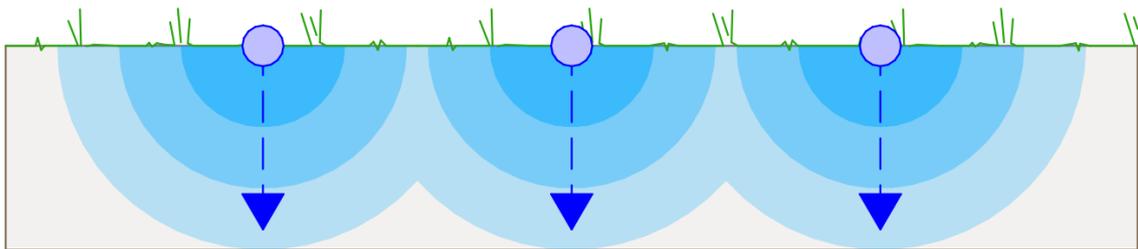


Abbildung 57 Ursache der lokalen Feuchteabweichungen

Quelle: Philipp Hänicke

Ein großes Problem stellt die Ermittlung der lokalen Feuchte dar. Im oben dargestellten schematischen Schnitt ist zu erkennen, dass das Wasser von den Bewässerungsschläuchen sich in Halbkreisen im Feld ausbreitet, wodurch eine inhomogene Verteilung des Wassers im Boden entsteht. Je nachdem wo sich der Sensor zur Messung der Bodenfeuchte befindet und in welcher Tiefe er misst, wird eine andere Bodenfeuchte ermittelt. Beim flächig auftretenden Niederschlag sind die Abweichung nur in vertikaler Richtung vorhanden; beim der künstlichen punktförmigen Bewässerung ist diese Inhomogenität sowohl in vertikaler, als auch in horizontaler Richtung vorhanden. Da diese Inhomogenität nicht beseitigt werden kann, müssen die Messdaten nachträglich korrigiert werden. Zudem führt die Bewässerung zu einer Durchspülung, sodass in den Bereichen unter den Schläuchen das Wasser deutlich schneller in Richtung der Drainage versickert.

Analyse mittels Karnaugh-Tafel

Um weitere fehlerhafte Werte herauszusortieren, wurde zunächst der Fall betrachtet, dass kein Wassereintrag auf die Forschungsfelder erfolgt, d.h. $N = 0$ und $B = 0$. Da dieser Fall recht häufig auftritt, lohnt sich eine mathematische Betrachtung dessen. Dabei gilt dann folgende Formel:

$$ETP = -\Delta F - D$$

Formel 11 Evapotranspiration ohne Wassereintrag

Da die Evapotranspiration immer ≥ 0 sein muss, gilt folglich:

$$ETP \geq 0 \rightarrow \Delta F + D \geq 0$$

Daraus ergeben sich folgende Bedingungen:

$$\Delta F \leq 0$$

$$|\Delta F| \geq D$$

In der unten stehenden Karnaugh-Tafel sind diese Bedingungen abgebildet. Dabei sind die mathematisch nicht möglichen Zustände als mathematische Fehler gekennzeichnet. Ein negativer Dachabfluss ist physikalisch nicht möglich, da, wie bereits beim Dachabfluss betrachtet, kein Wasser vom CTD-Sammelbehälter zurück aufs Dach fließen kann. Zudem ist es nötig, dass ohne äußeren Wassereintrag die Bodenfeuchte nicht zunehmen kann. Für den Fall, dass ΔF kleiner null und D größer null sind, aber $|\Delta F| < D$ ist, so sollte dies mit einer Anpassung der Messreihen behebbar sein. Dies kann durch eine Stauchung der Messwertkurve in einen Zielwertbereich oder durch Änderung der Kalibrierungsfunktion des Sensors geschaffen werden.

	$D > 0$	$D = 0$	$D < 0$
$\Delta F > 0$	math. Fehler	math. Fehler	unmöglich*
$\Delta F = 0$	math. Fehler	in Ordnung	unmöglich*
$\Delta F < 0$	$ \Delta F > D$: in Ordnung $ \Delta F < D$: Kalibrierung nötig	in Ordnung	unmöglich*

* bereits durch Korrektur der falsch-negativen Dachabflüsse ausgeschlossen

Tabelle 32 Fehlertabelle ohne Wasserzufuhr
Quelle: Philipp Hänicke

Kurve stauchen auf Zielwertspanne

Eine mögliche Lösung besteht in einer Stauchung der Kurve in einen Zieldatenbereich. Dazu werden die Minimalwerte und Maximalwerte der Messreihe eines jeden Feldes an den Zielbereich angepasst und die Messwerte entsprechend in den Zielwertbereich skaliert.

$$F_{st} = (F_{mess} - min_{mess}) \cdot \frac{(max_{st} - min_{st})}{(max_{mess} - min_{mess})} + min_{st}$$

Formel 12 Kurvenstauchung in Zielwertbereich

Die Zielkurve erhält den vom Hersteller Optigrün für das Substrat angegebenen Wert der maximalen Bodenfeuchte von 35%; der Minimalwert der Messwertkurve bleibt auch der Minimalwert der Zielkurve.

Nach Anwendung auf alle Messreihen für die Bodenfeuchte war festzustellen, dass kein plausibles Ergebnis erzielt werden konnte. Dadurch, dass der Zielwertebereich bei den meisten Messreihen deutlich kleiner ist als der Messwertebereich, fiel der Anstieg bzw. die Senkung entsprechend geringer aus, was dazu führte, dass bei hohen Dachabflüssen die Änderung der Bodenfeuchte zu gering war, sodass weitere negative Verdunstungswerte entstanden. Insgesamt sank das Minimum aller ermittelten Tageswerte auf unter -280 l/m^2 . Zum Vergleich: Ohne Kurvenstauchung lag das Minimum bei etwa -42 l/m^2 . Deswegen wird mangels Plausibilität von einer Kurvenstauchung abgesehen.

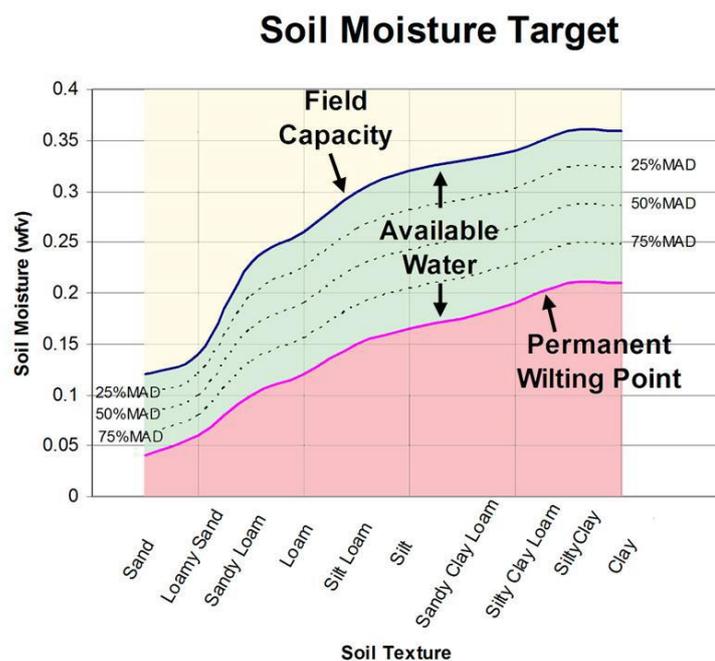


Tabelle 33 Bodenfeuchte nach Bodenzusammensetzung
Quelle: (Stevens Water Monitoring Systems 2018, 39 Bild 5.3)

Änderung der Kalibrierungsfunktion

Eine mögliche Ursache für fehlerhafte Bodenfeuchtwerte könnte in einem Kalibrierungsfehler der Sensoren liegen. In den Sensoren sind bereits voreingestellte Kalibrierungsfunktionen hinterlegt, die vom Benutzer ausgewählt oder auch angepasst werden können. Bei dem hydraProbe-Sensor wird die Bodenfeuchte aus der dielektrischen Permittivität ermittelt. Die Kalibrierung zur Ermittlung der Bodenfeuchte in Vol% kann durch eine Polynomformel 3-ten Grades oder durch eine semi-lineare Quadratwurzelformel erfolgen. Ersteres wird für organische Böden und Rockwool empfohlen, letztere für alle allgemeinen Böden, sowohl sandig, tonig, lehmig, als auch schluffig. Da das Substrat des Daches eher unter allgemeine Böden fällt, wird letztere Formel angewandt:

$$F = A \cdot \sqrt{\varepsilon_r} + B$$

Formel 13 Kalibrierungsfunktion
nach Steven Water Monitoring Systems

Als Parameter werden $A = 0,109$ und $B = -0,179$ vom Hersteller empfohlen, die auch in den Sensoren in den Forschungsfeldern voreingestellt sind. (vgl. Stevens Water Monitoring Systems 2018, 56f.) Anhand einer Studie wurde festgestellt, dass diese viele verschiedene Bodenarten sich mit ähnlichen, fast gleichen Parametern berechnen lassen. (vgl. Rowlandson u. a. 2013, 342 Tab. 5)

Um andere Parameter für die Werte A und B zu verwenden, müssen die Messwerte zunächst auf die Ursprungswerte zurückgerechnet und mit den neuen Parametern daraufhin erneut kalibriert werden. Dies erfolgt mit nachstehender Formel, die nach der dielektrischen Permittivität umgestellt wird:

$$F = A \cdot \sqrt{\varepsilon_r} + B$$

Formel 14 Kalibrierungsfunktion
nach Steven Water Monitoring Systems

$$\sqrt{\varepsilon_r} = \frac{F - B}{A}$$

Formel 15 Umgestellte
Kalibrierungsfunktion

$$\sqrt{\varepsilon_r} = \frac{F_{\text{mess}} - B_{\text{Hersteller}}}{A_{\text{Hersteller}}} = \frac{F_{\text{neu}} - B_{\text{neu}}}{A_{\text{neu}}}$$

Formel 16 Kalibrierungsfunktion mit alten
und neuen Parametern

$$F_{\text{neu}} = \frac{A_{\text{neu}} \cdot (F_{\text{mess}} - B_{\text{Hersteller}})}{A_{\text{Hersteller}}} + B_{\text{neu}}$$

Formel 17 Funktion umgestellt nach neuer
Bodenfeuchte

Mit dieser Formel können mithilfe der frei einstellbaren Parameter A_{neu} und B_{neu} der Anstieg der Bodenfeuchtekurve und deren Offset beeinflusst werden. Ziel ist es, die Kurve so zu verändern, dass zwei Bedingungen erfüllt werden:

- Alle daraus errechneten Verdunstungs-Tageswerte sollten > 0 sein
- Die maximale Bodenfeuchte aller Messreihen sollte 35 Vol% nicht überschreiten.

Da das Offset (B_{neu}) nur einen Einfluss auf die Größe der Werte, jedoch nicht auf den Anstieg der Kurve und damit auch nicht auf die sich verändernde Bodenfeuchte-Masse, kann mit diesem Parameter die Kurve so verschoben werden, dass deren Maximalwerte unterhalb von 35 Vol% bleiben.

Nachfolgend wurde ermittelt, mit welchem Faktor A_{neu} alle Tageswerte der Verdunstungsmassen gleich Null sind oder über Null liegen. Dazu wurde mit Excel eine Zielwertsuche durchgeführt. Diese blieb allerdings ohne gültiges Ergebnis. Ursache dafür war, dass es generell nicht möglich war, dass alle Tageswerte größer oder gleich Null sind. Durch Verringerung des Anstiegs konnten zwar einige Negativwerte in Richtung null korrigiert werden, gleichzeitig bildeten sich aber neue Negativwerte, da an einigen Stellen der Dachabfluss daraufhin größer war als die Menge des durch Absenkung der Bodenfeuchte freigesetzten Wassers.

Allerdings konnten zwei Feststellungen getroffen werden: Bei ca. $A = 0,0035$ war ein Minimum der absoluten Fehlerwerte von 149 negativen Tageswerten zu erkennen. Außerdem war bei $A = 0$ das Minimum aller Tageswerte mit 0,344 am nächsten an Null; dies bedeutet allerdings, dass die Bodenfeuchte nicht berücksichtigt wird. Daraus lässt sich schließen, dass die Bodenfeuchtwerte derart falsch sind, dass diese auch unter Anpassung der Kalibrierung nicht nutzbar sind.

Vermutungen zur Ursache

Ursache für diese Messwert-Abweichungen können vielseitig sein. Ein Fehler innerhalb des Messensors ist als unwahrscheinlich anzunehmen, da die Fehler in allen Feldern auftraten. Außerdem sind die negativen Verdunstungswerte auch zu allen Wettersituationen vorhanden, sodass die Ursache eines spezifischen Witterungsereignisses ebenfalls unwahrscheinlich ist.

Als Hauptursache kommt daher das anfangs festgestellte Problem der lokalen Feuchte in Betracht. Die durch die ungleichmäßige Eintragung des Wassers verursachte Inhomogenität der Feuchte im Boden lässt sich nur schwer durch einen einzelnen Bodenfeuchtesensor prüfen. Weitere redundante Sensoren gleicher Bauart sind nicht innerhalb eines Feldes vorhanden, sodass eine Prüfung der Vermutung und damit der Daten nur schwer möglich ist.

Neben der lokalen Feuchte können auch weitere Probleme in Betracht gezogen werden, die ebenfalls verantwortlich sein könnten oder auch die Messfehler verursacht durch die lokale Feuchte verstärkt haben könnten. Zum einen könnte die verwendete ursprünglich Berechnungsformel für die Evapotranspiration nicht ausreichend sein, da dieser Berechnung vereinfachende Annahmen zugrunde liegen. Zum einen wird die Bildung von Kondensat aus der Luft in Form von z.B. Morgentau nicht berücksichtigt, was als zusätzliche Feuchtequelle die fehlenden Feuchteinträge erklären könnte. Zudem gibt es eine Drainage-Schicht, in der Wasser gestaut werden kann. Das dort gespeicherte Wasser wird allerdings nicht vom Bodenfeuchte-Sensor erfasst, da das Wasser den Boden bereits wieder verlassen hat. Gleichzeitig wurde es aber vom Dachabfluss noch nicht registriert, sondern kommt dort zeitversetzt an, insofern es nicht von den Wurzeln der Pflanzen aufgenommen wird.

Prüfung über Wägung

Eine Möglichkeit zur indirekten Ermittlung der Bodenfeuchte kann auch über das Gewicht der Forschungsfelder erfolgen. In den Feldern FI.1 bis FI.3 sind mit dem Lysimeter Wägezellen verbaut worden, die kontinuierlich das Gewicht der einzelnen drei Forschungsfelder stündlich messen. Da die genaue Zusammensetzung des Substrats nicht bekannt und konstant ist, ist es nicht möglich über das Gewicht allein die exakte Bodenfeuchte zu bestimmen. Geht man allerdings von der Annahme aus, dass die Menge und damit auch die Masse des Substrats konstant ist und vernachlässigt man die Massezunahme für die Monate Juni und Juli, so hat allein das im Boden befindliche Wasser einen Einfluss auf die Änderung des Gewichts. Wird also eine Änderung des Gewichts eines Forschungsfeldes durch die Wägezelle registriert, so ist die allein auf eine Änderung der Bodenfeuchte zurückzuführen. Mittels der Dichte des Wassers von $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ lässt sich aus der Änderung der Masse die Volumenänderung ableiten, die wiederum im Verhältnis zum Volumen des Bodens im For-

schungsfeld von $V_{\text{Feld}} = 0,20 \text{ m} \cdot 3,50 \text{ m}^2 = 0,70 \text{ m}^3$ die Änderung der volumetrischen Bodenfeuchte ergibt:

$$B_{\text{Lys}} = \frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{\text{Feld}}} = \frac{\rho_{\text{Wasser}}}{A_{\text{Feld}} \cdot h_{\text{Substrat}}} \cdot \Delta m_{\text{Feld}} \quad \text{Formel 18 Bodenfeuchteermittlung aus Volumenanteilen}$$

Zur Überprüfung, ob die Lysimeterdaten sinnvollere Werte ergeben, bietet sich ein direkter Vergleich an. Im unten stehenden Diagramm ist die Feuchtebilanz für die Felder FI.1 bis FI.3 dargestellt unter Nutzung der Messdaten aus den Bodenfeuchtesensoren und den CTD-Messungen. Es ist gut zu erkennen, dass viele negative Evapotranspirationsmassen auftreten. Eine negative Evapotranspiration ist allerdings nicht möglich, weshalb in diesem Fall von Fehlwerten gesprochen werden muss. Von den errechneten 61 Tageswerten sind je nach Feld zwischen 14 und 18 negative und damit fehlerhafte Werte vorhanden, was einem Anteil von 22% bis knapp 30% entspricht. Außerdem sind die negativen Werte sehr groß, sodass diese auch nicht vernachlässigbar sind.

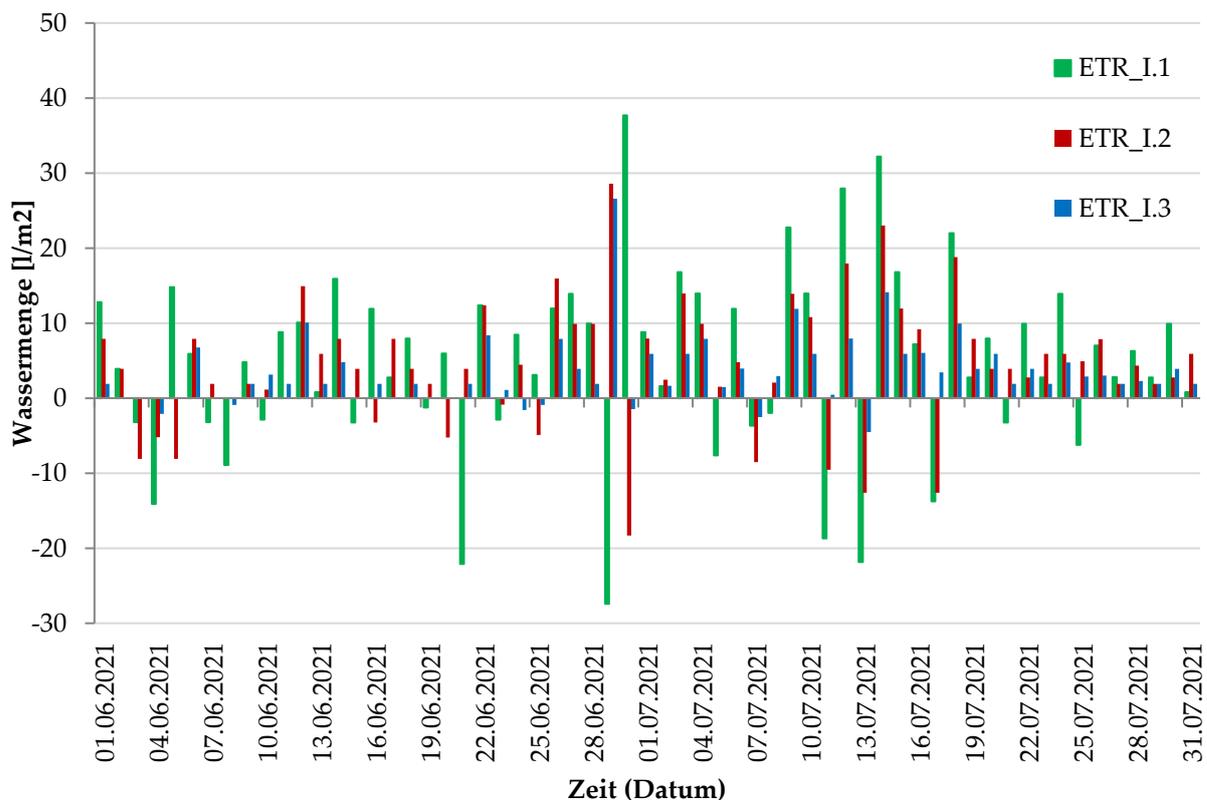


Diagramm 11 Verdunstung Felder FI.1 bis FI.3 mittels Bodenfeuchte- & CTD-Sensoren
Quelle: Philipp Hänicke

Führt man dieselbe Feuchtbilanzierung unten Nutzung der errechneten Bodenfeuchteänderung aus den Gewichtänderungen des Lysimeters und des Lysimeter-Runoffs durch, so zeigt sich ein deutlich anderes Bild: Es treten kaum noch Fehlwerte auf und die Schwankung der Evapotranspirationskurve ist ebenfalls stark verringert. Diese Verläufe der Verdunstungskurven können als plausibel angenommen werden.

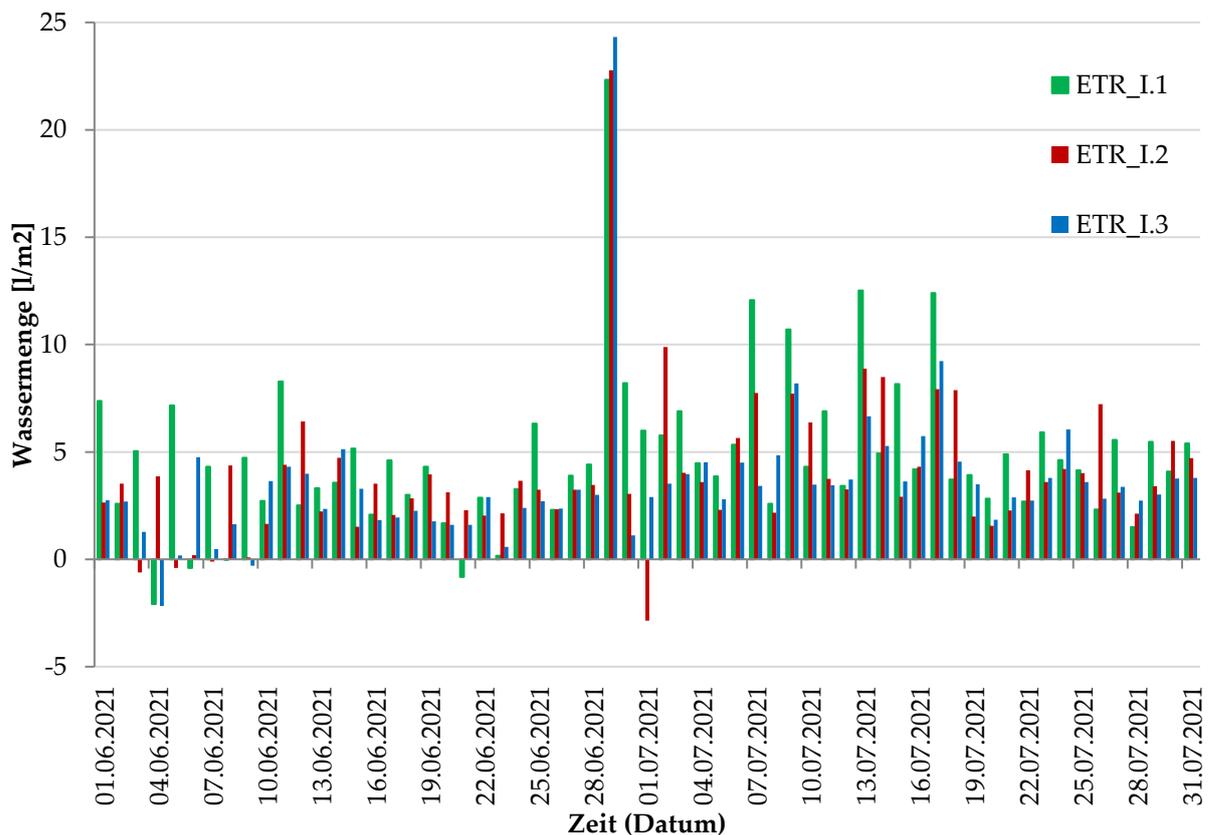


Diagramm 12 Verdunstung Felder FI.1 bis FI.3 mittels Lysimeterdaten
Quelle: Philipp Hänicke

Auch die Anzahl der Fehlerwerte ist unter Nutzung der Lysimeterdaten deutlich verringert: So treten nur noch 2 bis 4 von 61 Tageswerte (3% bis knapp 7%) negativ auf, zumal diese nur geringfügig negativ sind.

Anzahl Fehlerwerte	ETP_I.1	ETP_I.2	ETP_I.3
...nach Ermittlung der Bodenfeuchte via Sensor	18 29,51%	14 22,95%	15 24,59%
...nach Ermittlung der Bodenfeuchte via Wägung	4 6,56%	4 6,56%	2 3,28%

Tabelle 34 Fehlerwerte bei der Verdunstung nach Ermittlungsart der Bodenfeuchte
Quelle: Philipp Hänicke

4.5.4 Vertikales Temperaturprofil

Bei der Auswertung der Temperaturlanzen wurden nicht alle Datensätze benötigt und entsprechend auch nur ein Teil geprüft. Für die Temperaturlanze 2 ist im Zeitraum vom 09.06. bis zum 07.07.2021 ein Ausfall des Sensors zu verzeichnen, da für diesen Zeitraum keine Daten von dem Sensor erfasst worden. Die Daten der Sensoren erscheinen grundsätzlich plausibel. Lediglich die Messpunkte 1 und 4 an Temperaturlanze 2 weisen nicht plausible Werte auf: Diese zeigen minimal gemessenen Temperaturen liegen deutlich unten Null Grad Celsius, sowie unrealistische Messwerte und Messwertschwankungen. Entsprechend sind diese beiden Datenreihen nicht für die Auswertung geeignet; die anderen Messpunkte von Temperaturlanze 2 können für den Zeitraum, für den Daten vorliegen, ausgewertet werden.

Pos. 1	T_L1_P1	T_L2_P1	T_L3_P1	T_L4_P1	T_L5_P1	T_L6_P1
Minimum	13,40	-8,10	14,30	10,10	15,50	16,20
Maximum	31,90	25,20	33,70	43,70	32,80	33,20
Ø	21,54	19,46	22,05	23,98	23,04	23,17
Anz. <5°C	0	76	0	0	0	0
Nullwerte	0	645	0	0	0	0
Pos. 10	T_L1_P10	T_L2_P10	T_L3_P10	T_L4_P10	T_L5_P10	T_L6_P10
Minimum	5,84	6,01	5,77	5,59	5,85	6,17
Maximum	38,60	33,00	41,70	41,40	42,30	42,40
Ø	21,49	21,24	21,87	22,38	22,12	22,08
Anz. <5°C	0	0	0	0	0	0
Nullwerte	0	645	0	0	0	0

Tabelle 35 Statistische Kennwerte aller Temperaturlanzen, Pos. 1 & 10

Quelle: Philipp Hänicke

Temp.-Lanze 1	T_L1_P1	T_L1_P2	T_L1_P3	T_L1_P4	T_L1_P5	T_L1_P6	T_L1_P7	T_L1_P8	T_L1_P9	T_L1_P10
Minimum	13,40	12,90	11,80	10,40	8,52	6,66	5,93	5,79	5,45	5,84
Maximum	31,90	32,20	33,20	35,70	38,70	41,20	40,20	39,20	38,70	38,60
Ø	21,54	21,53	21,43	21,41	21,29	21,45	21,50	21,28	21,21	21,49
Anz. <5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nullwerte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Temp.-Lanze 2	T_L2_P1	T_L2_P2	T_L2_P3	T_L2_P4	T_L2_P5	T_L2_P6	T_L2_P7	T_L2_P8	T_L2_P9	T_L2_P10
Minimum	-8,10	13,30	13,40	-2,00	12,00	9,89	8,10	6,43	5,76	6,01
Maximum	25,20	25,50	25,90	26,60	29,20	39,50	33,30	33,70	33,40	33,00
Ø	19,46	21,42	21,40	15,31	21,83	21,41	21,35	21,37	21,23	21,24
Anz. <5°C	76	0	0	212	0	0	0	0	0	0
Nullwerte	645	645	645	645	645	645	645	645	645	645

Tabelle 36 Statistische Kennwerte Temperaturlanzen 1 & 2

Quelle: Philipp Hänicke

5 MESSDATENAUSWERTUNG

5.1 PHÄNOTYPISCHE BETRACHTUNG

Bei der phänotypischen Vergleichsanalyse wird versucht, einen kausalen Zusammenhang zwischen Bewässerung und Pflanzenwachstum qualitativ anhand des Erscheinungsbildes nachzuweisen. Dabei wird das Aussehen der Pflanzen im Juni 2022 untersucht und fotografisch festgehalten. Alle Bilder wurden direkt hintereinander aufgenommen.

Feldgruppe I (sonnig)

Für die Betrachtung der Felder der sonnigen Feldgruppe, so werden die drei nebeneinander befindlichen, zusätzlich mit einem Lysimeter versehenen, Felder FI.1 bis FI.3 ausgewählt. An diesen ist deutlich erkennbar, dass der Bewuchs des Feldes FI.1 am stärksten ausgeprägt ist, während der Bewuchs im Feld FI.2 geringer und in Feld FI.3 noch einmal deutlich geringer ausfällt. In diesem Fall ist die Bewässerung zur Bewuchsdichte analog, da Feld FI.1 alle 2 Tage, Feld FI.2 alle 4 Tage und Feld FI.3 nur alle 8 Tage bewässert wurde. Die phänotypische Ausprägung der Felder FI.5 und FI.6 ist ähnlich der analog bewässerten Felder selbiger Feldgruppe (siehe Fotodokumentation).

Feld I.3

alle 8 Tage bewässert



Feld I.2

alle 4 Tage bewässert



Feld I.1

alle 2 Tage bewässert



Fotos: Alexander Swirin

Feldgruppe II (halbschattig)

In Feldgruppe II ist ebenfalls ein Unterschied in der Dichte des Bewuchses nach Bewässerungsmenge erkennbar. Dieser zeigt sich besonders deutlich beim Vergleich der Felder FII.2 bis FII.4, bei denen das alle 2 Tage bewässerte Feld FII.4 einen deutlich dichteren Bewuchs als Feld FII.3 (alle 4 Tage bewässert) aufweist, welches wiederum auch eine dichteren Bewuchs als Feld FII.2 (alle 8 Tage bewässert) aufweist. Bei den Feldern FII.5 bis FII.7 ist der Unterschied nur marginal bis nicht erkennbar und zeichnet sich dort eher, wenn überhaupt, durch die Wuchshöhe ab.

Feld II.7

alle 2 Tage bewässert

**Feld II.6**

alle 4 Tage bewässert

**Feld II.5**

alle 8 Tage bewässert

**Feld II.4**

alle 2 Tage bewässert

**Feld II.3**

alle 4 Tage bewässert

**Feld II.2**

alle 8 Tage bewässert



Fotos: Alexander Swirin

Feldgruppe III (schattig)

Bei den schattigen Feldern ist der Unterschied zwischen den Bewuchsdichten nicht so hoch, wie bei den sonnigen Feldern. Die unten gezeigten Felder weisen nur geringe Unterschiede in der Bewuchsdichte auf, wobei lediglich bei Feld FIII.4 ein geringerer Bewuchs zu verzeichnen ist. Auch auf dem nicht aufgeführten Feld FIII.7 war ein ähnlich dichter Bewuchs zu verzeichnen.

Feld III.6

alle 2 Tage bewässert

**Feld III.5**

alle 4 Tage bewässert

**Feld III.4**

alle 8 Tage bewässert

**Feld III.3**

alle 2 Tage bewässert

**Feld III.2**

alle 4 Tage bewässert

**Feld III.1**

alle 8 Tage bewässert



Fotos: Alexander Swirin

Fazit der phänotypischen Betrachtung

In der sonnigen Feldgruppe lässt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Bewuchsdichten und Bewuchshöhen der einzelnen Felder erkennen. Dieser scheint abhängig von der Bewässerung zu sein, da Felder, die stärker bewässert werden auch deutlich stärkeren Bewuchs aufweisen. In den halbschattigen Feldern ist der Unterschied in der Ausprägung des Bewuchses zwar teilweise erkennbar, aber nicht derart stark ausgeprägt oder gar nicht erkennbar. Bei den schattigen Feldern hingegen ist der Bewuchs bei fast allen Feldern gleich stark, sodass dort keine nennenswerten Unterschiede nach Bewässerung zu konstatieren sind.

Konkret lässt sich aus diesen Beobachtungen ableiten, dass der Einfluss der Bewässerung auf die Stärke des Bewuchses direkt proportional zur Besonnung des Standortes ist. Demzufolge scheint besonders an sonnigen Standorten eine Bewässerung sehr effektiv zu sein, um den Bewuchs deutlich zu fördern und damit eine höhere Bewuchsdichte und Bewuchshöhe zu erwirken.

Da die Verdunstung maßgeblich von der Blattoberfläche der Pflanzen und damit von der Bewuchsstärke abhängig ist, lässt sich feststellen, dass an dem sonnigen Standort mit einer deutlich höheren Verdunstung in den bewässerten Feldern im Vergleich zu den nicht bewässerten Feldern zu rechnen ist. Analog sollten die Unterschiede in der Verdunstung von den halbschattigen Feldern nach Bewässerungsmasse geringer ausfallen, während bei den schattigen Feldern nur marginale Unterschiede zu erwarten sind.

Zudem ist feststellbar, dass die schattigen Felder deutlich höheren Bewuchs aufweisen als die sonnigen Felder, sodass die Blattoberfläche indirekt proportional zur Besonnung des Standortes ist.

5.2 TEMPERATURPROFIL

In den beiden unten stehenden Diagrammen sind die Temperaturverläufe der einzelnen Messpunkte an den Temperaturlanzen 1 und 2 aufgezeigt. Temperaturlanze 1 befindet sich in Feld FI.1, welches alle 2 Tage bewässert wird, Temperaturlanze 2 in Feld FI.2, welches alle 4 Tage bewässert wird. In beiden Diagrammen ist gut der tägliche Temperaturverlauf mit den Schwankungen zwischen Tag- und Nachttemperatur erkennbar. Der rot dargestellte Temperaturverlauf von Messpunkt 10, der sich oben an der Temperaturlanze befindet, zeigt bis auf wenige Ausnahmen die stärksten Schwankungen zwischen Tages- und Nachttemperatur. Je tiefer der Messpunkt an einer Temperaturlanze liegt, desto gedämpfter fällt der Verlauf der Temperaturkurve aus, d.h. desto niedriger ist der Unterschied zwischen Tages- und Nachttemperatur. Dies ist gut erkennbar an den stärker gedämpften Kurven der mittleren Messpunkte (grüne Temperaturkurven), sowie die stark gedämpften Verläufe der unten an der Temperaturlanze befindlichen Messpunkte (blaue Temperaturkurven).

Ursächlich für diesen Dämpfungseffekt ist die Pufferwirkung des Substrats, welche die Wärme der Umgebungsluft des Tages im Sommer speichern und in den kühleren Nachtphasen langsam wieder abgeben kann. Eine Ausnahme bildet lediglich der Verlauf im Juni bei Temperaturlanze 1, wo die Schwankungen bei den Positionen 6 bis 9 stärker als bei Position 10 ist. Dies liegt vermutlich daran, dass das Blattwerk über dem Boden nicht so dicht ist wie einige Zentimeter darüber. Da das Blattwerk selbst Wärme puffert, ist bei den Messpunkten eine leichte Dämpfung zu verzeichnen. Zudem ist in den Daten zu erkennen, dass die im Temperaturkurven, je weiter unten sie gemessen wurden, zeitlich stärker versetzt auftreten, da durch die Pufferspeicherwirkung des Substrats der Wärmestrom durch das Substrat verlangsamt wird.

Da bei Temperaturlanze 2 die Messpunkte 1 und 4 zu vernachlässigen sind (siehe Messdatenanalyse), sind die Ausschläge der entsprechenden Kurven nicht weiter zu betrachten, aber de Vollständigkeit halber mit aufgeführt. Es ist gut zu erkennen, dass die Temperaturschwankungen generell in Feld FI.2 ein wenig niedriger sind, da zwar die Minimaltemperaturen ähnlich, aber die Maximaltemperaturen etwas niedriger sind. Dies ist dadurch begründbar, dass Feld FI.1 sich vermutlich in einer stärkeren Sonnenexposition befindet.

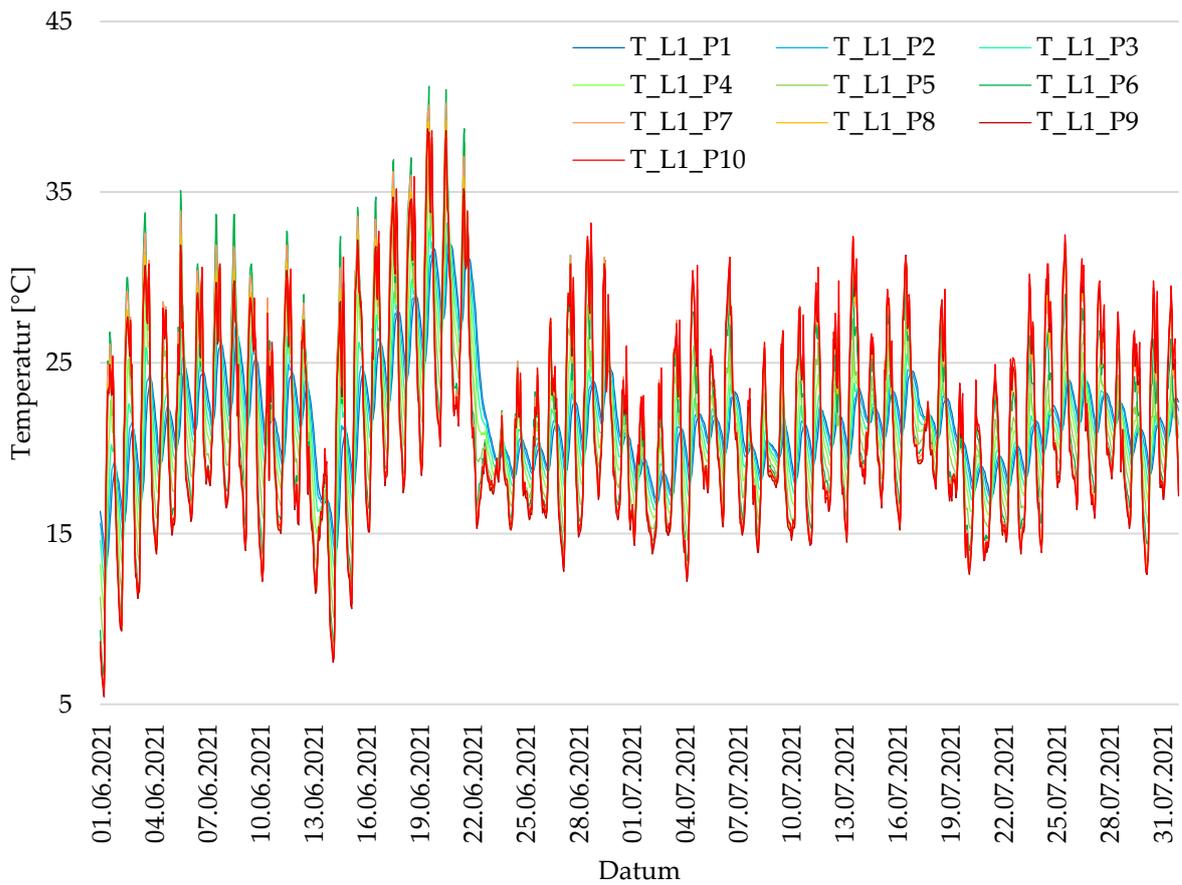


Diagramm 13 Temperaturlanze 1, Pos. 1 (unten) bis 10 (oben)

Quelle: Philipp Hänicke



Diagramm 14 Temperaturlanze 2, Pos. 1 (unten) bis 10 (oben)

Quelle: Philipp Hänicke

Weitere Erkenntnisse lassen sich aus dem Vergleich selbiger Messpunkte aller Temperaturlanzen ziehen. Vergleicht man die obersten Messpunkte aller Temperaturlanzen (Position 10), so ist gut zu erkennen, dass sich alle Temperaturkurven ähneln. Auch die Amplituden sind nahezu gleich groß. Da alle Felder direkt nebeneinander stehen, sind die klimatischen Verhältnisse entsprechend gleich, sodass auch die Temperaturkurven gleiche Verläufe aufzeigen sollten.

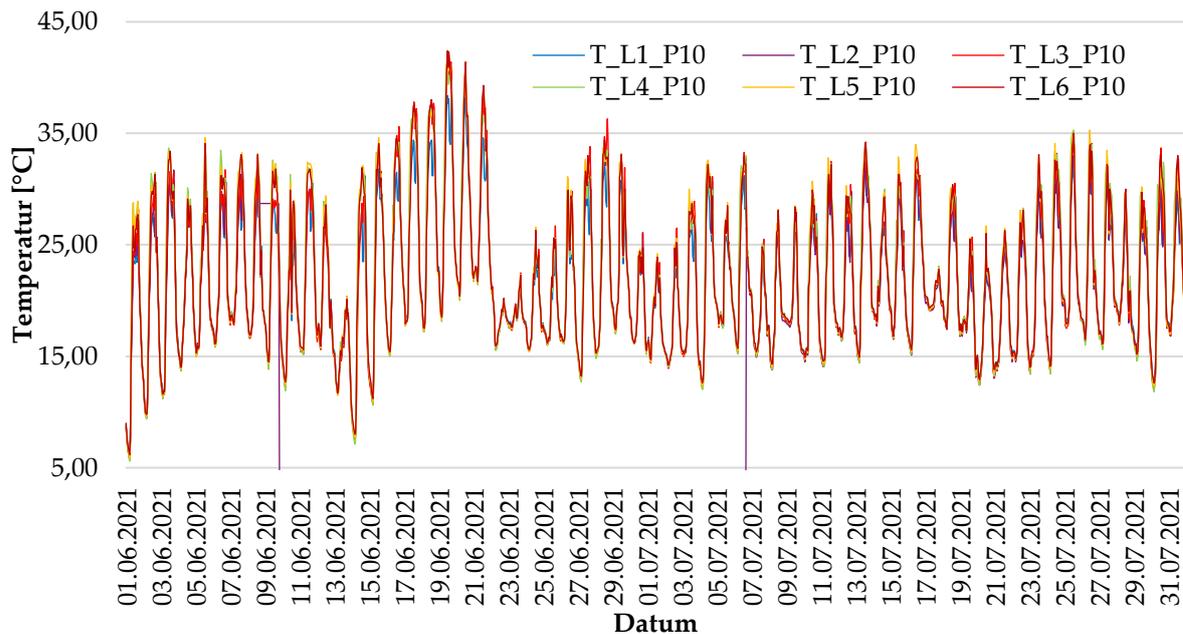


Diagramm 15 Temperaturlanzen, Pos. 10 (oben)
Quelle: Philipp Hänicke

Deutlich interessanter ist allerdings der Vergleich der untersten Messpunkte aller Temperaturlanzen (Position 1). Dort sind deutliche Unterschiede erkennbar: Feld FI.4 hat eine deutlich stärkere Amplitude im Tagesverlauf. Das liegt daran, dass es sich hierbei um das Referenzfeld mit Extensivbegrünung handelt. Alle anderen Felder weisen eine deutlich geringere Amplitude auf. Dies lässt sich quantitativ über die Standardabweichung nachweisen:

	L1	L3	L4	L5	L6
Pos. 10 (oben)	5,52	6,31	6,57	6,45	6,27
Pos. 1 (unten)	2,98	3,16	5,91	2,89	2,90

Tabelle 37 Standardabweichungen der obersten und untersten Position der VTP
Quelle: Philipp Hänicke

Die Standardabweichung ist an Position 10 aller Temperaturlanzen ähnlich und schwankt zwischen 5,52 und 6,57. An der untersten Position im Feld sind die Kurven so stark gedämpft, dass die Standardabweichung nur zwischen 2,89 und 3,16 – sich also fast halbiert

hat. Nur im Referenzfeld liegt diese untern bei 5,91. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die bewässerten Felder eine stark dämpfende Wirkung auf die Temperaturkurve im Boden haben, da das nur extensiv begrünte Feld kaum eine Dämpfung aufweist. Eine Ableitung zur Dämpfungswirkung nach Bewässerungsintensität lässt sich aufgrund der relativ nah beieinander liegenden Standardabweichungen nicht treffen, auch wenn Feld FI.3 (alle 8 Tage bewässert) eine etwas schwächer gedämpfte Temperaturkurve aufweist. Diese Dämpfungswirkung der Temperaturkurve zeigt ein gutes Dämmverhalten des Substrats in Kombination mit der einfachen Intensivbegrünung, sodass diese Dachkonstruktion einen hohen Beitrag zum Wärmeschutz von Gebäuden leisten kann.

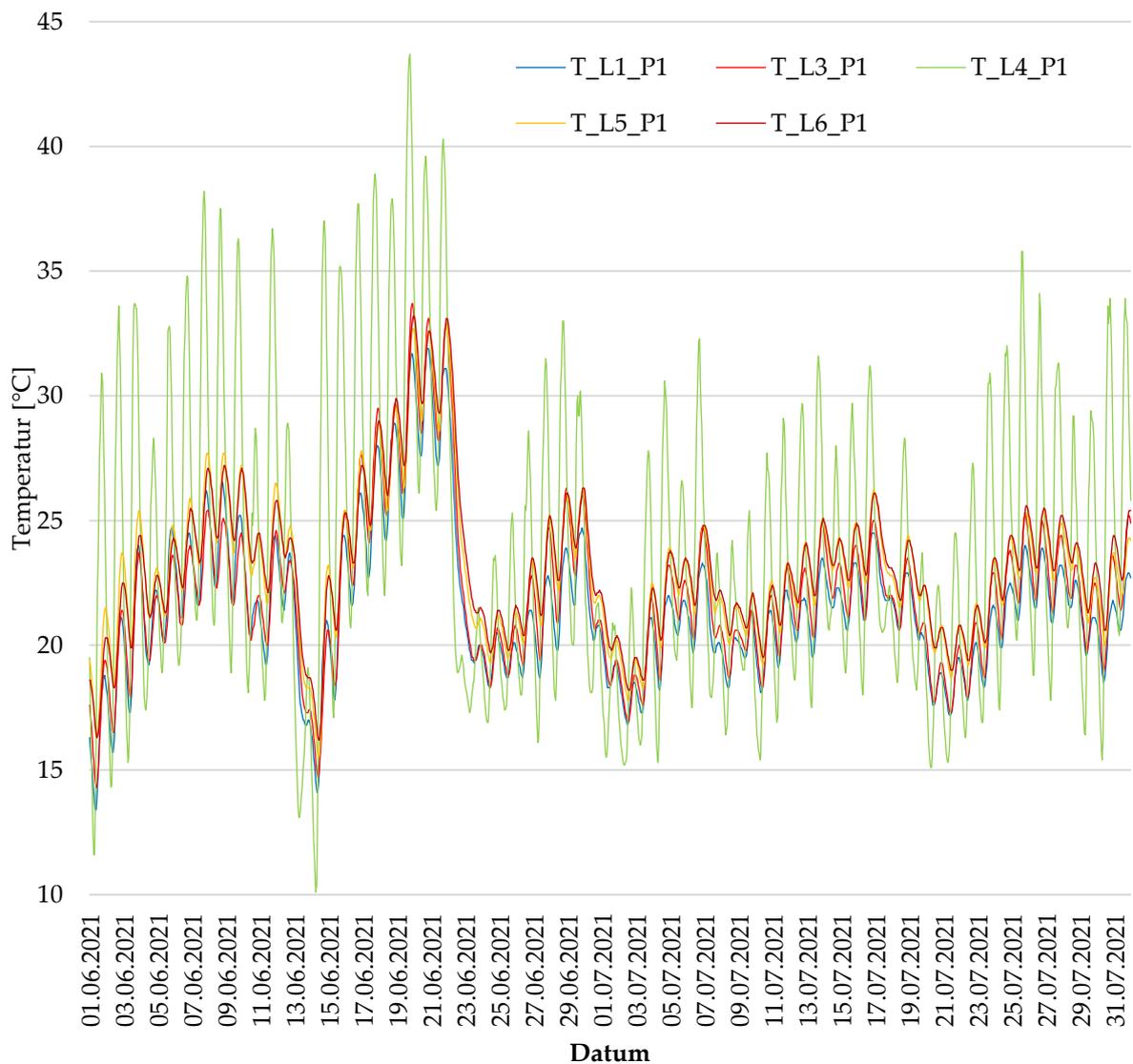


Diagramm 16 Temperaturlanzen, Pos. 1 (unten)

Quelle: Philipp Hänicke

5.3 FEUCHTEBILANZIERUNG

Die Feuchtebilanz kann quantitativ aufgrund der in der Messdatenanalyse genannten Fehler nur für die Felder FI.1 bis FI.3 quantitativ bestimmt werden. Für alle anderen Felder sind die Daten allerdings soweit verwertbar, dass eine qualitative Auswertung möglich ist.

Im unten stehenden Diagramm ist die Feuchtebilanz beispielhaft für Feld FI.1 aufgestellt. Dort wird ersichtlich, dass der Niederschlag stark auf die Feuchtebilanz einwirkt, besonders an regenstarken Tagen. Die alle 2 Tage stattfindende Bewässerung hat dagegen an Tagen ohne Niederschlag einen hohen Einfluss auf die Evapotranspiration. Gleichzeitig ist auch gut sichtbar, dass die Wasserspeicherkapazität des Bodens einen wichtigen Beitrag zur Versorgung der Pflanzen und der konstanten Evapotranspiration leistet, da in Zeiten hohen Wassereintrages das Wasser im Boden gespeichert und zeitverzögert wieder abgegeben wird. Die Evapotranspiration selbst ist nahezu jeden Tag vorhanden und dabei besonders stark an Tagen mit viel Niederschlag.

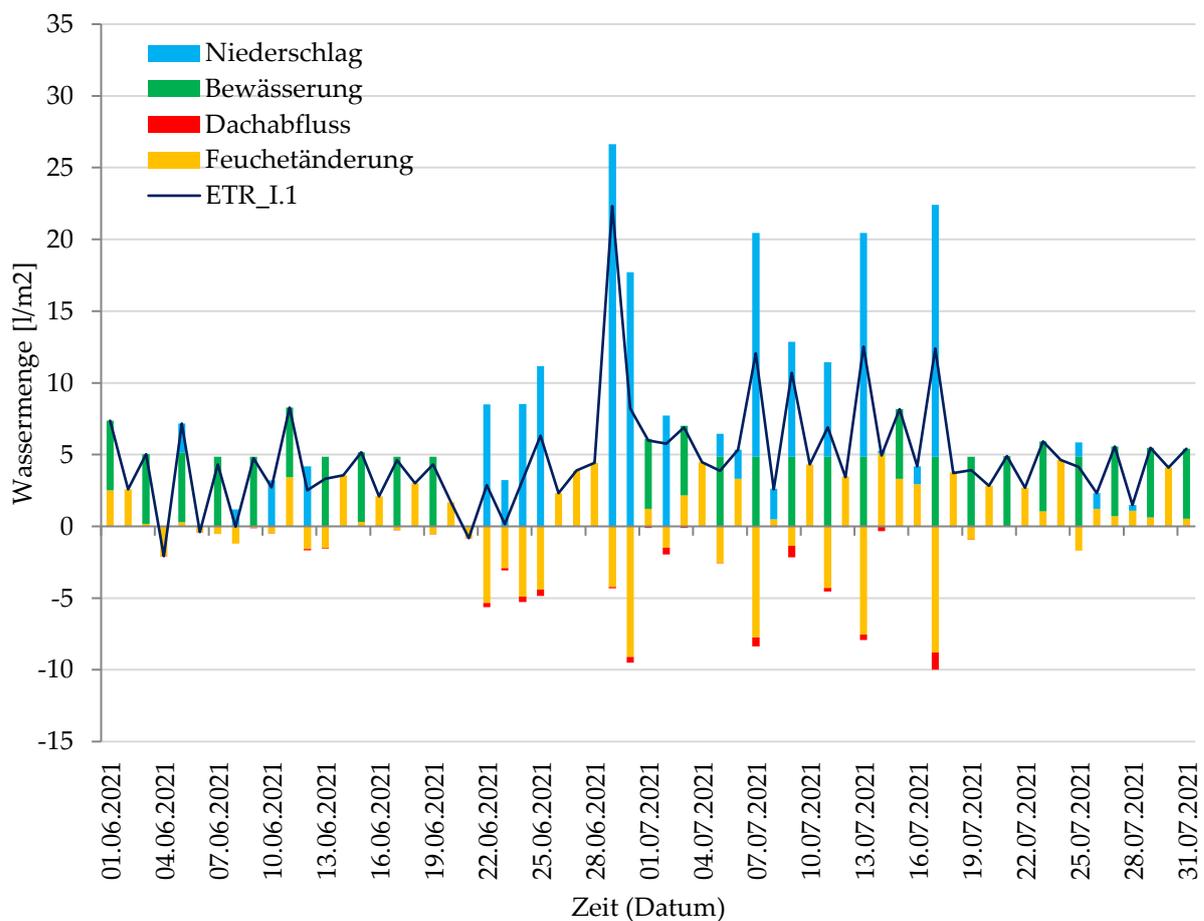


Diagramm 17 Feuchtebilanz Feld FI.1 (mit Lysimeterdaten) VTP
Quelle: Philipp Hänicke

Feldgruppe I: sonnig

Zuerst werden die Evapotranspirationsmassen von den Feldern FI.1 bis FI.3 quantitativ untersucht. In diesen stark besonnenen Feldern ist nahezu täglich in allen Feldern eine Verdunstung sichtbar. Auffällig ist die besonders starke Verdunstung während des starken Regenerenisses am 29.06 und 30.06.2021. Dort wird von allen drei Feldern nahezu gleich viel Wasser evapotranspiriert. An trockeneren Tagen wechseln sich die drei Felder beim Maxima der Verdunstung meist ab, allerdings ist besonders im Juli 2021 auffällig, dass Feld FI.1 an einigen Tagen deutlich mehr Wasser abgibt als die anderen Felder. Dies könnte daran liegen, dass der Bewuchs stärker und durch die erhöhte Bewässerung alle 2 Tage eine größere Blattoberfläche sowie mehr Wasser zu Verdunstung zur Verfügung stehen.

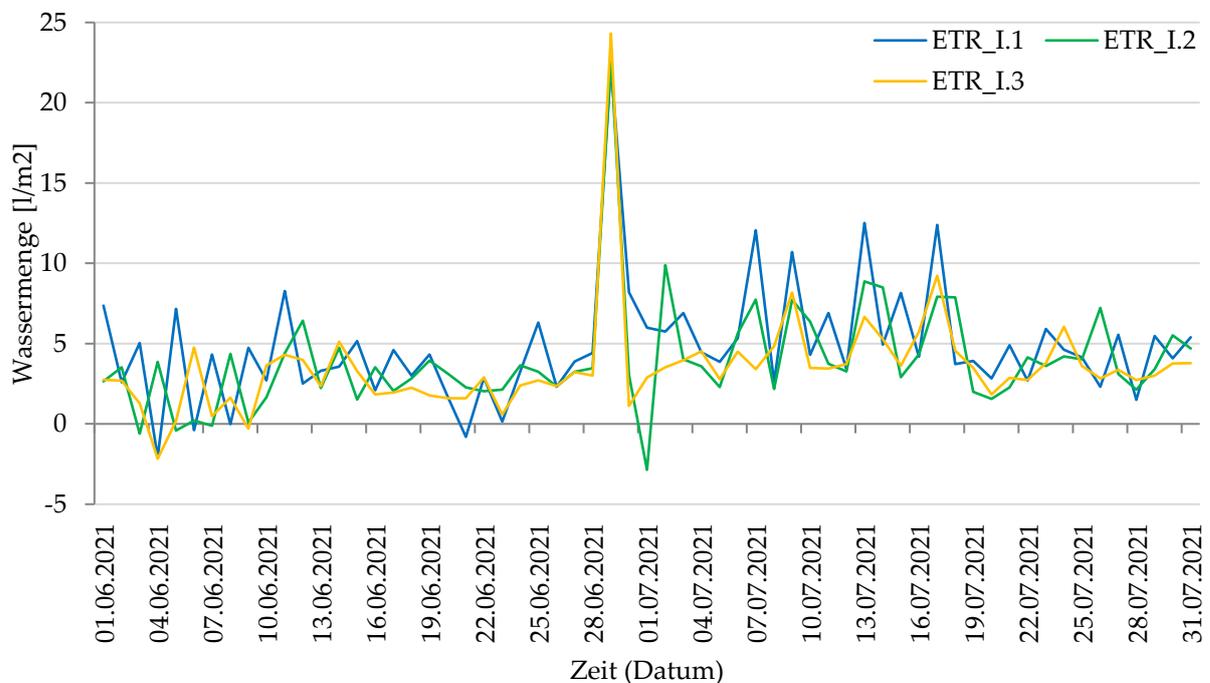


Diagramm 18 Evapotranspirationsmasse Felder FI.1 bis FI.3 (Lysimeterdaten)
Quelle: Philipp Hänicke

	ETP_I.1	ETP_I.2	ETP_I.3
Bewässerung	alle 2 d	alle 4 d	alle 8 d
\sum ETP [l/m ²]	294,43	240,07	215,86

Tabelle 38 Summe der Evapotranspirationsmassen Felder FI.1 bis FI.3 (Lysimeter)
Quelle: Philipp Hänicke

In der Summe der Evapotranspirationsmasse über den gesamten Zeitraum für die drei Felder wird allerdings deutlich, dass Feld FI.1 als alle 2 Tage bewässertes Feld am meisten Was-

ser mit insgesamt 294,43 l/m² abgibt, gefolgt von dem alle 4 Tage bewässerten Feld FI.2 mit 240,07 l/m² und schlussendlich das nur alle 8 Tage bewässerte Feld FI.3 mit 215,86 l/m². Damit ist deutlich erkennbar, dass die eine erhöhte Bewässerung zu einer deutlich höheren Evapotranspirationsmasse führt.

Für alle Felder von Feldgruppe I kann eine qualitative Auswertung durchgeführt werden. Trotz ungenauer und teilweise nicht auswertbarer Messwerte können über den Verlauf der Evapotranspirationskurven Tendenzen abgeleitet werden. Zudem werden die Summen der Evapotranspirationsmassen über den gesamten Zeitraum verglichen.

In unten stehendem Diagramm sind die Evapotranspirationskurven aller sonnigen Felder aufgeführt. Auch hier sind ist deutlich zu erkennen, dass Feld FI.1, welches alle 2 Tage bewässert wird (blau), an sehr vielen Tagen das Maxima an Verdunstung besitzt. Die nur alle 8 Tage bewässerten Felder (orange) weisen im Kurvenverlauf meist die geringsten Evapotranspirationswerte auf, während die alle 4 Tage bewässerten Felder (grün) bei der Evapotranspirationsmenge meist dazwischen liegen. Dies ist besonders gut Mitte Juli zu erkennen, während im Juni dieses Schema weniger klar zu sehen ist.

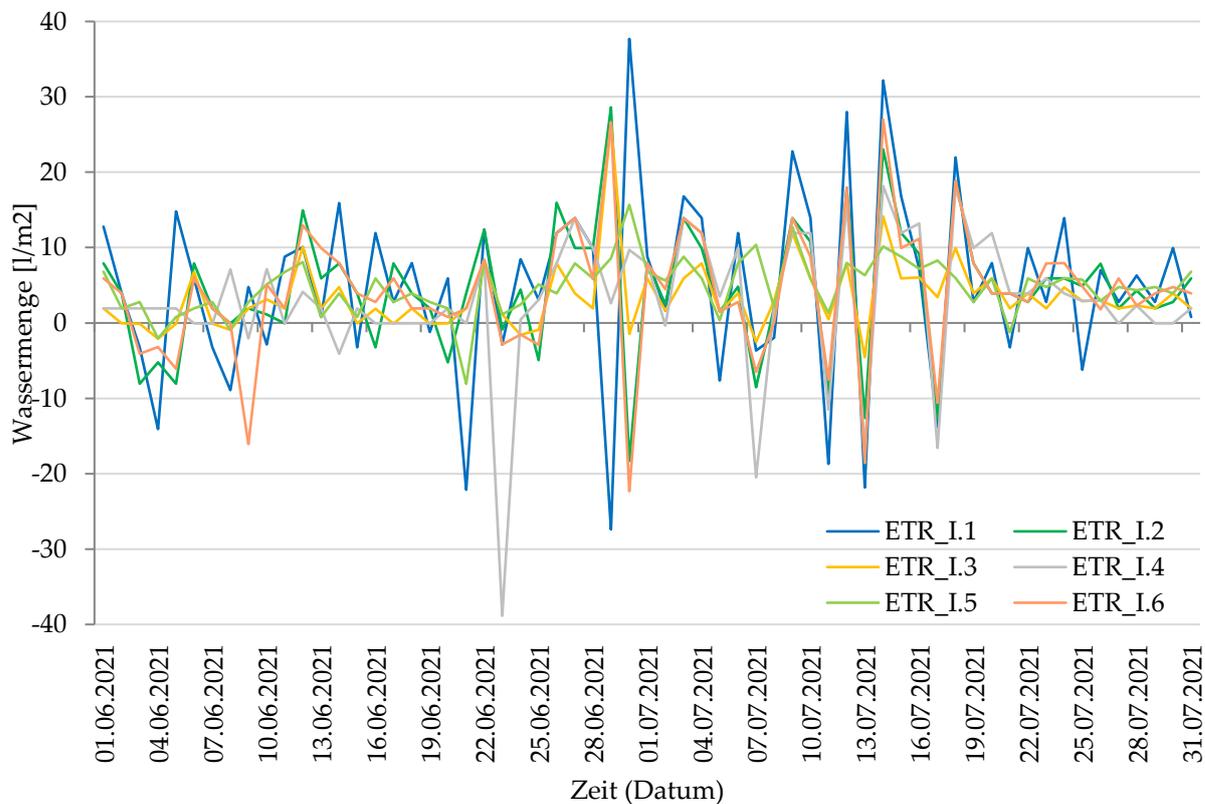


Diagramm 19 Evapotranspiration (qualitativ) FI (sonnig)
Quelle: Philipp Hänicke

	ETP_I.1	ETP_I.2	ETP_I.3	ETP_I.4	ETP_I.5	ETP_I.6
Bewässerung	alle 2 d	alle 4 d	alle 8 d	keine	alle 4 d	alle 8 d
Σ ETP [l/m ²]	300,28	267,08	208,95	178,56	290,36	251,29

Tabelle 39 Summe der Evaoptranspirationsmassen Feldgruppe I
Quelle: Philipp Hänicke

Das Referenzfeld FI.4 fällt durch einen deutlich niedrigeren Kurvenverlauf auf, was auf eine deutliche geringe Evapotranspiration hindeutet. Bei den Mengen der Evapotranspiration wird dies auch noch einmal deutlicher: Das alle 2 Tage bewässerte Feld FI.1 (blau) weist eine Evapotranspirationsmasse von etwa 300 l/m² auf, die alle 4 Tage bewässerten Felder (grün) liegen bei etwa 265 bis 290 l/m² und die alle 8 Tage bewässerten Felder (orange) bei etwa 200 bis knapp über 250 l/m². Am niedrigsten fällt das Referenzfeld mit einer geringen Evapotranspirationsmasse von knapp 180 l/m² auf, was nur etwas mehr als die Hälfte des alle 2 Tage bewässerten Feldes ist. Damit ist hierbei deutlich zu sehen, dass die Bewässerungsmenge einen deutlichen Einfluss auf die Evapotranspirationsmasse hat: Je höher die Bewässerung bzw. der Bewässerungsintervall, desto mehr Wasser wird über die Blattoberflächen an die Umgebung abgegeben.

Feldgruppe II: halbschattig

In der halbschattigen Feldgruppe II besitzen die Kurven generell eine geringere Amplitude. Die Maxima einer Kurve sind oft in einem ähnlichen Bereich und schwanken nicht derart stark wie die Maxima einer Kurve der stark besonnten Felder. Die gedämpfteren Kurven weisen zudem an regenarmen Tagen eine konstante Verdunstung auf, die ähnlich derer von den besonnten Feldern ist. Zudem ist auffällig, dass es viele Tage gibt, an denen das Maximum an Verdunstung von den Feldern mit dem geringsten Bewässerungsintervall ausgeht.

	ETP_II.2	ETP_II.3	ETP_II.4	ETP_II.5	ETP_II.6	ETP_II.7
Bewässerung	alle 8 d	alle 4 d	alle 2 d	alle 8 d	alle 4 d	alle 2 d
Σ ETP [l/m ²]	259,69	265,38	278,37	212,94	244,02	294,21

Tabelle 40 Summe der Evaoptranspirationsmassen Feldgruppe II
Quelle: Philipp Hänicke

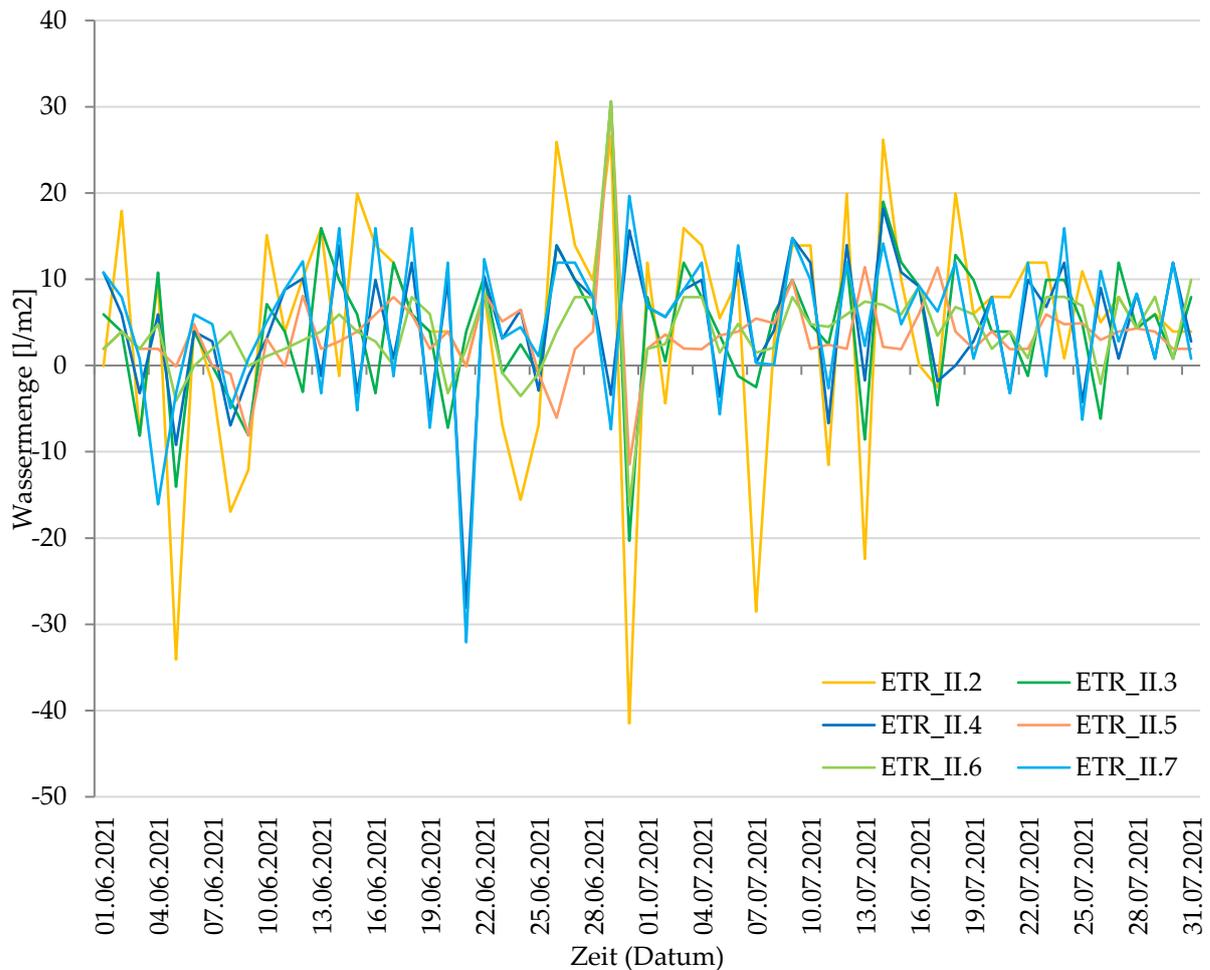


Diagramm 20 Evapotranspiration (qualitativ) FII (halbschattig)

Quelle: Philipp Hänicke

Bei der Betrachtung der Summen der Evapotranspirationsmassen wird allerdings deutlich, dass sich der in Feldgruppe I beobachtete Trend auch in Feldgruppe II fortsetzt: Die Evapotranspirationsmasse der am stärksten bewässerten Felder (blau) liegt zwischen 278 und 295 l/m², die der alle 4 Tage bewässerten Felder zwischen 244 und 265 l/m² und die der am geringsten bewässerten Felder (orange) zwischen 213 und 260 l/m².

Damit zeigt sich auch hier die Tendenz, dass die Evaporationsmasse direkt proportional zur Bewässerung zunimmt, wenn auch tendenziell weniger stark als bei den besonnten Feldern. Lediglich ist festzustellen, dass die Evapotranspirationsmassen etwas geringer als in stärker besonnten Feldern gleicher Bewässerungsintensität sind. Dabei ist allerdings anzumerken, dass sowohl Feldgruppe I als auch Feldgruppe II nach der Definition von Reif 2010 als sonnige Felder gelten, sodass der minimale Unterschied in der Summenauswertung beider Feldgruppen sogar vernachlässigt werden könnte. Die Daten des Referenzfeldes FII.1 sind aufgrund von fehlerhaften Sensordaten leider nicht auswertbar.

Feldgruppe III: schattig

In der schattigen Feldgruppe 3 wechseln sich bei den Tagesmaxima die Felder unterschiedlicher Bewässerungsintensität ab. An den regenreichen Tagen Ende Juni weisen aber besonders die am stärksten bewässerten Felder eine hohe Evapotranspirationsmasse auf. Eine Tendenz bezüglich höherer Evapotranspirationsmassen von stärker bewässerten Feldern ist herbei nur geringfügig erkennbar.

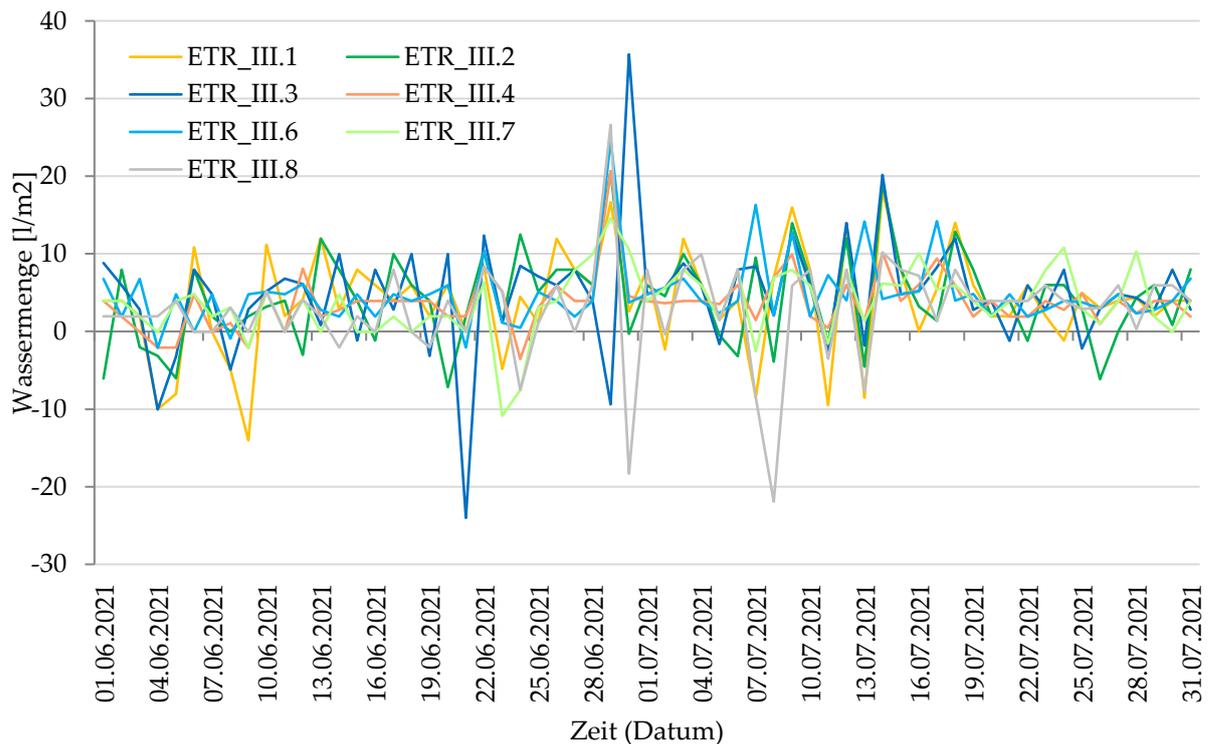


Diagramm 21 Evapotranspiration (qualitativ) FIII (schattig)
Quelle: Philipp Hänicke

	ETP_III.1	ETP_III.2	ETP_III.3	ETP_III.4	ETP_III.6	ETP_III.7	ETP_III.8
Bewässerung	alle 8 d	alle 4 d	alle 2 d	alle 8 d	alle 2 d	alle 4 d	keine
\sum ETP [l/m ²]	237,71	255,63	285,40	225,28	292,22	227,13	165,65

Tabelle 41 Summe der Evapotranspirationsmassen Feldgruppe III
Quelle: Philipp Hänicke

Anders sieht dies bei den Summen der Evapotranspirationsmassen aus. Dabei sind deutliche Unterschiede in der Verdunstung je nach Bewässerungskapazität erkennbar: Die alle 2 Tage bewässerten Felder (blau) liegen zwischen 285 und 292 l/m², die alle 4 Tage bewässerten Felder (grün) zwischen 227 und 256 l/m² und die nur alle 8 Tage bewässerten Felder (orange) zwischen 225 und 238 l/m².

5.4 ZUSAMMENHÄNGE MIT BEWÄSSERUNG UND STANDORT-FAKTOREN

Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass die Evapotranspiration bei Dächern mit einfacher Intensivbegrünung deutlich höher ist als bei nicht begrüntem Dächern (Vergleich Feld FIII.8) oder extensiv begrüntem Dächern (Vergleich Feld FI.4) In der unter stehenden Tabelle sind die Unterschiede der Forschungsfelder im Vergleich zu den Referenzfeldern im sonnigen und schattigen Besonnungsgrad deutlich zu erkennen.

	alle 2 Tage bewässert	alle 4 Tage bewässert	alle 8 Tage bewässert	Referenz
FI.1 – FI.3	294,43	240,07	215,86	-
Feldgruppe I	300,28	267,08 – 290,36	208,95 – 251,29	178,56
Feldgruppe II	278,37 – 294,21	244,02 – 265,38	212,94 – 259,69	-
Feldgruppe III	285,40 – 292,22	227,13 – 255,63	225,28 – 237,71	165,65
Alle Angaben in l/m ²				

Tabelle 42 Übersicht über abgeschätzte Evapotranspirationsmassen
Quelle: Philipp Hänicke

Gleichermaßen erkennbar ist auch der Unterschied je nach Bewässerung. Je häufiger oder stärker bewässert wird, desto höher ist auch die Evapotranspiration und desto höher der entsprechend Kühlungseffekt für die Umgebung.

Weniger Einfluss als zunächst erwartet hat die Besonnung. Je nach Bewässerungsintensität sind die Evapotranspirationsmassen in einem ähnlichen Rahmen, sodass sich daraus nicht unbedingt eine Tendenz ableiten lässt. Hier bedarf es weiterer Untersuchungen, um den Einfluss der Besonnung präziser feststellen zu können.

Allerdings ist eine detaillierte und quantitativ präzise Auswertung aktuell aufgrund der fehlerhaften Datensätze nicht möglich. Die hier gezeigten Summen sind nur als Größenordnung zu verstehen, die, mit Ausnahme der mit den Lysimeterdaten berechneten Feldern FI.1 bis FI.3, nicht ausreichend präzise und fehlerfrei sind.

6 FAZIT

Durch die Analyse und Auswertung der Daten lassen sich einige allgemeingültige Aussagen zu Dächern mit einfacher Intensivbegrünung ableiten. Gleichmaßen können aus der Analyse auch Aussagen zur Auswertbarkeit der Messdaten und zukünftiger Betrachtungen gemacht werden.

6.1 FEHLERHAFTE MESSDATEN

Es ist zunächst zu konstatieren, dass einige der vorhandenen Messdaten derart fehlerhaft sind, dass diese nicht verwendet oder nicht geprüft werden konnten.

Die Niederschlagsmessung an den Forschungsfeldern stimmte nicht mit den Messdaten der etwa 100 Metern entfernt stehenden Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes in Kooperation mit dem Umweltamt der Stadt Dresden überein. Da die Daten von letzterer Station zumindest teilweise vom Deutschen Wetterdienst geprüft wurden und lokal nicht weit entfernt aufgezeichnet wurden, konnten diese als Niederschlagsdaten genutzt werden. Die Wetterstation an den Forschungsfeldern hingegen zeigte Niederschläge an ganz anderen Tagen an. Möglicherweise handelt es sich dabei um einen Messfehler, der in naher Zukunft behoben werden kann, z.B. durch regelmäßige Prüfung auf Verstopfung des Messinstruments.

Die CTD-Messungen wurden zwar entsprechend der Vorgaben des Herstellers mit entsprechenden Schlitzwehrformeln umgerechnet, entsprachen aber schlussendlich dennoch nicht der Realität, sondern zeigten täglich einen fast konstanten Dachabfluss an, auch an Tagen, an denen weder Niederschlag noch Bewässerung gegeben waren. Zudem gab es spontane Messwertabfälle, die nicht erklärbar sind. Für die Felder FI.1 bis FI.3 konnten die redundanten Messwerte vom Lysimeter verwendet werden. Für die restlichen Felder hingegen gibt es keine Prüfungsmöglichkeit. Abhilfe schaffen könnte ein Tausch der Abflussmessgeräte gegen Systeme, die keine derart komplexen Umrechnungen erfordern, da diese komplexen Systeme fehleranfällig sind. Dies könnten zum Beispiel Durchfluss-Sensoren sein. Alternativ könnte über den Einbau von Lysimetern in allen Feldern nachgedacht werden, insofern dies nachträglich noch möglich ist.

Die Bodenfeuchtemessung ist nicht repräsentativ, da die Sensoren hauptsächlich nur die lokale Feuchte ermitteln können, die weder repräsentativ für das gesamte Feld, sondern teilweise nicht realistisch ist, da diese teilweise Bodenfeuchtwerte von bis zu 95% gemessen hat. Die Ermittlung der Bodenfeuchteänderung über die vom Lysimeter gemessene Gewichtsänderung erwies sich hingegen als nützlich und plausibel, auch wenn diese nur für die Felder FI.1 bis FI.3 vorhanden ist. Dies würde ebenfalls für den nachträglichen Einbau von Lysimetern mit Wägezellen in die anderen Felder sprechen. Alternativ sollten die Bodenfeuchtesensoren getauscht werden gegen Modelle, die weniger anfällig für Abweichungen durch die lokale Feuchte sind.

Das Lysimeter-Runoff ist teilweise abhängig vom Wind, da die Felder teilweise im Regenschatten des Gebäudes liegen. Gegebenenfalls sollte der Einfluss vom Wind auf den Niederschlag in zukünftigen Auswertungen noch näher betrachtet werden.

6.2 ZUSAMMENHÄNGE MIT KLIMATISCHEN RANDBEDINGUNGEN

Besonders die klimatischen Randbedingungen haben einen Einfluss auf die Verdunstung. Dies gilt sowohl für die Verdunstung, als auch für die Bewässerung.

6.2.1 Verdunstung nach Einstrahlung

Auf den sonnigen Feldern ist der Wasserverbrauch der Pflanzen am höchsten. Durch die hohe Sonneneinstrahlung können diese aber auch deutlich buschiger wachsen, wodurch mehr Blattoberfläche vorhanden ist. Entsprechend ist bei ausreichender Bewässerung ein hoher Verdunstungseffekt zu erkennen. Ist die Bewässerung allerdings gering, so brauchen die Pflanzen das wenige Wasser selbst, da sonst eine Austrocknung stattfinden würde. In sonnigen Bereichen sollte demzufolge stark bewässert werden, um eine hohe Verdunstung zu erzielen. Auf den schattigen Feldern können die Pflanzen generell etwas besser wachsen, vor allem bei geringerer Bewässerung. Dafür sind die Pflanzen generell etwas kleiner und die Verdunstung entsprechend etwas niedriger als bei sonnigen Feldern mit gleicher Bewässerungsintensität.

6.2.2 Verdunstung nach Bewässerungsvolumen (quantitativ)

Den größten Einfluss auf die Evapotranspiration hat die Bewässerung. Je höher die Bewässerung ist, desto mehr Wasser verdunstet. Dies gilt sowohl für sonnige, als auch für schattige Felder, wobei der Effekt bei sonnigen Feldern etwas höher ist. Die Bewässerung alle 2 Tage war dementsprechend am zielführendsten für eine möglichst hohe Verdunstung. Generell könnte die Bewässerungsmenge noch gesteigert werden, um eine noch höhere Verdunstung zu erzielen, insofern die bereitgestellte Grauwassermenge dafür ausreichend sein sollte.

Generell empfiehlt es sich, die Felder eher konstant mit geringeren Mengen zu bewässern, da die geringe Substrathöhe von 20 cm nur kleinere Mengen an Wasser speichern kann und die maximale Bodenfeuchte sonst schnell erreicht werden könnte. In nächster Zeit wird anhand dieser Erkenntnisse die Bewässerung umgestellt: Die Zeitintervalle und die Bewässerungsmengen werden halbiert, sodass dann alle 1, 2 und 4 Tage jeweils 8,5 Liter Wasser auf die Felder aufgebracht werden.

6.3 EMPFEHLUNGEN FÜR BAU & BEWÄSSERUNG VON GRÜNDÄCHERN

Für den Bau von Gründächern kann die Nutzung einer einfacher Intensivdachbegrünung aus verschiedensten Gründen empfohlen werden: Zum einen bietet die einfache Intensivdachbegrünung eine hohe Dämmwirkung, wodurch ein besserer Wärmeschutz gewährleistet wird oder Dämmung in der Dachkonstruktion eingespart werden kann. Des Weiteren bietet diese Art von Gründach einen hohen Kühleffekt für die Umgebung, welcher nicht nur für das Gebäude, sondern auch für die Menschen einen positiven Effekt hat.

Als Bewässerungssystem ist die Nutzung von Grauwasser empfehlenswert, vor allem bei Neubauten, bei denen die entsprechenden Leitungen im Rohbau direkt mit verlegt werden können. Im Bestandsbau empfiehlt sich die Grauwassernutzung, wenn eine Auskopplung des Grauwassers aus dem Abwassersystem des Gebäudes relativ einfach möglich sein sollte. Alternativ oder zusätzlich ist die Nutzung von Regenwasser empfehlenswert, da meist sowieso nicht genug Grauwasser zur vollständigen Bewässerung der Dachfläche zur Verfügung steht. Generell ist die Verdunstung höher, je stärker das Gründach bewässert wird. Das Wasser muss zur Nutzung für die Bewässerung des Gründachs allerdings vorher gereinigt

werden. Hier empfiehlt sich der Einbau einer Pflanzenkläranlage, sollte der Platz dafür vorhanden sein. Bei geringerem Platz oder niedrigerem Budget empfiehlt sich eine Filteranlage mittels Aktivkohle, mit der das Grauwasser und/oder Regenwasser ebenfalls gereinigt werden kann.

Bei der Bepflanzung ist zu beachten, dass nur bestimmte Pflanzen das Grauwasser vertragen. Zudem ist die Wahl der Pflanzen auch vom Besonnungsgrad abhängig, da die Pflanzen auf Flachdächern meist starker Besonnung ausgesetzt sind. Die spezifische Pflanzung sollten dabei von einem Landschaftsbauer geplant werden.

Die Intensität der Bewässerung sollte generell möglichst hoch sein. Dabei ist allerdings die Speicherfunktion des Daches begrenzt, sodass grundsätzlich lieber wenig, aber dafür häufig bewässert werden sollte, als selten und viel.

Zwar war durch die Messdatenauswertung nicht nachweisbar, dass die Verdunstung in sonnigen Bereichen tatsächlich höher ist, allerdings war im phänotypischen Vergleich ein deutlich dichter Bewuchs bei stärkerer Bewässerung bei höherem Besonnungsgrad zu verzeichnen.

6.4 AUSBLICK

In der nächsten Zeit werden die Messungen noch einmal angepasst werden, um Messfehler korrigieren und die derzeit nicht verwertbaren Datensätze auswertbar zu machen. Zudem werden redundante Messungen geschaffen, um alle Messdaten prüfen zu können. Die Auswertung wird daraufhin ausgeweitet werden auf weitere Betrachtungszeiträume, wie z.B. einen bewässerten Winterfall.

Parallel wird dazu anhand der Messdaten versucht, eine Berechnungsformel für die Evapotranspirationsmassen zu entwickeln, die allgemeingültig für Dächer mit einfacher Intensivbegrünung ist. Diese soll dann die Grundlage bilden für die Implementatation der einfachen Intensivdachbegrünung in das Delphin-Modell. Ziel des gesamten Vorhabens ist, ein digitales Delphin-Modell für die Berechnung von Gründächern zu entwickeln, mit dem die klimatischen Auswirkungen von Gründächern auf die Umgebung simuliert werden können.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- Ahrendt, Jana. 2007. „Historische Gründächer: Ihr Entwicklungsgang bis zur Erfindung des Eisenbetons“, März. <https://doi.org/10.14279/depositonce-1549>.
- Ansel, Wolfgang, Julian Zeidler, und Dr. Thomas Esch. 2015. „Fernerkundliche Identifizierung von Vegetationsflächen auf Dächern zur Entwicklung des für die Bereiche des Stadtklimas, der Stadtentwässerung und des Artenschutzes aktivierbaren Flächenpotenzials in den Städten“. Deutscher Dachgärtner Verband e.V. (DDV). <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-30299.pdf>.
- Baehr, Hans Dieter, und Stephan Kabelac. 2016. *Thermodynamik Grundlagen und technische Anwendungen*. 16., Aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Vieweg. <http://www.dbod.de/login?url=http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49568-1>.
- BGL e.V. 2014. „Dämmung durch Dachbegrünung“. *Landschaft (Bauen & Gestalten)*, Nr. 47.
- Cascone, Stefano, Julia Coma, Antonio Gagliano, und Gabriel Pérez. 2018. „The evaporation process in green roofs: A review“. *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.024>.
- Donau, Jessica. 2022. „Kosten und Nutzen von Gründächern“. Dresden: Technische Universität Dresden.
- Dürr, Albrecht. 1994. *Dachbegrünung ein ökologischer Ausgleich ; Umweltwirkungen, Recht, Förderung*. Wiesbaden: Bauverl.
- DWD. 2021. „Niederschlag: vieljährige Mittelwerte 1991 - 2020“. 2021. https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/nieder_9120_SV_html.html?jsessionid=56932E9BB49343B734DC3CE7ECC0790A.live11043?view=na&nn=16102.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau Arbeitskreis Dachbegrünung, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, Fachvereinigung Bauwerksbegrünung, und Rainer Bohlen. 2002. *Hinweise zur Pflege und Wartung von begrünten Dächern*. 1. Aufl. Bonn: FLL.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, und Hans-Joachim Liesecke. 1989. *Grundlagen der Dachbegrünung zur Planung, Ausführung und Unterhaltung von Extensivbegrünungen und einfachen Intensivbegrünungen*. 1. Aufl. Berlin: Patzer.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, und Gilbert Lösken. 2018. *Dachbegrünungsrichtlinien Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen*. Ausgabe 2018, 6. Ausgabe. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. <https://d-nb.info/1169357504/04>.
- Helbig, Alfred. 1999. *Stadtklima und Luftreinhaltung mit ... 79 Tabellen*. 2., Vollständig überarb. und erg. Aufl. Berlin: Springer. <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz073977330cov.htm>.
- Hietel, Prof. Dr. Elke, Prof. Dr. Oleg Panferov, und Prof. Dr. Ute Rößner. 2016. „Extensive Dachbegrünungen im urbanen Raum“. *Transforming Cities*, Nr. 3: 18–22.
- Höschele, Karl, und Horst Schmidt. 1974. „Klimatische Wirkungen einer Dachbegrünung“. *Garten und Landschaft* 84 (6): 334–37.
- Kolb, Walter. 2016. *Dachbegrünung*. scholars-Titel ohne Reihe. Ulmer. <https://elibrary-utb-de.wwwdb.dbod.de/doi/book/10.1399/9783800107773>.
- Lohaus, Prof. Dipl.-Ing. Irene. 2021. „Modellprojekt Integrales Wassermanagement: 1. Zwischenbericht“. Zwischenbericht 35353/01-23. Dresden.

- Mann, Dr. G. 2020. „Lärminderung durch Gebäudebegrünung“. *Der Bauleiter*, Nr. September 2019 (Februar). <https://www.derbauleiter.info/laerminderung-durch-gebäudebegrünung/>.
- Moderow, Uta. 2019. „Zur thermischen Wirkung von Dachbegrünung in Höhe des Straßenniveaus“. *IÖR Schriften*, Nr. 77: 255–63.
- Ohlwein, Klaus. 1989. *Dachbegrünung, ökologisch und funktionsgerecht Biologische und technische Grundlagen - bauphysikalische Auswirkungen - Aufbausysteme - gebaute Beispiele*. 2., Neubearb. u. erw. Aufl. Augsburg: Augustus-Verl.
- Optigrün International AG. 2016. „Modellprojekt Integrales Wassermanagement mit einfacher Intensivdachbegrünung - Forschungsantrag“.
- — —. 2022. „Natur hat Zukunft. Mit der Kompetenz von Experten.“ <https://www.dachbegrünung-ratgeber.de/wp-content/uploads/pdf/optigruen-kompetenzbroschuere-de.pdf>.
- Reiche, Dieter. 1991. *Dachbegrünung einfach und dauerhaft; mit ... und 16 Systemangeboten, 8 Übersichtstabellen*. 1. Aufl. Berlin: Verlag für Bauwesen.
- Rowlandson, Tracy L., Aaron A. Berg, Paul R. Bullock, E. RoTimi Ojo, Heather McNairn, Grant Wiseman, und Michael H. Cosh. 2013. „Evaluation of Several Calibration Procedures for a Portable Soil Moisture Sensor“. *Journal of Hydrology* 498 (August): 335–44. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.021>.
- Stevens Water Monitoring Systems. 2018. „HydraProbe Manual“. https://www.stevenswater.com/resources/documentation/hydraprobe/HydraProbe_Manual_Jan_2018.pdf.
- Theodosiou, Theodore G. 2003. „Summer Period Analysis of the Performance of a Planted Roof as a Passive Cooling Technique“. *Energy and Buildings* 35 (9): 909–17. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00023-9).
- Walker, Ralf, und Dieter Schenker. 2016. „Optimierung der Evapotranspirations- und Kühlleistung ex-tensiver Dachbegrünungen durch gezielte Nutzung von Grauwasser; Abschlussbericht für die Deutschen Bundesstiftung Umwelt“. Freising/Nürtingen.