

Reihe KLIMOPASS-Berichte

Projektnr.: 4500285871/23

Untersuchungen zur Kühlwirkung und der Niederschlagsretention der extensiven Dachbegrünungsvegetation

von

J. Franzaring, M. Anemou, L.C. Hernandez Cubero, I. Katsarov, Z. Kauf, A. Mohiley L. Steffan und A. Fangmeier

Finanziert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)

Oktober 2014

KLIMOPASS

– Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
KONTAKT KLIMOPASS	Dr. Kai Höpker, Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, Kai.Hoepker@lubw.bwl.de
FINANZIERUNG	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Programm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg (KLIMOPASS)
BEARBEITUNG UND VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT	Franzaring, J., Anemou, M., Hernandez Cubero, L.C., Katsarov, I., Kauf, Z., Mohi- ley, A., Steffan, L. und Fangmeier, A., Universität Hohenheim, Institut für Land-schafts- und Pflanzenökologie
BEZUG	http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U83-W03-N13
STAND	Oktober 2014, Internetausgabe April 2015

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

ZUSAMMENFASSUNG	4	
1	EINLEITUNG	6
2	KENNTNISSTAND	8
2.1	Geschichte der Dachbegrünung	8
2.2	Dachbegrünung in Deutschland	8
2.3	Extensive Dachbegrünung	9
2.4	Stadtökologische Aspekte von Dachbegrünungen	12
2.5	Kühlwirkung von Gründächern	14
2.6	Zielsetzung des Projekts	16
3	MATERIAL UND METHODEN	18
3.1	Experimente zur Kühlwirkung von Pflanzenbeständen	18
3.2	Gewächshausexperimente zu ausgewählten Pflanzenarten	29
4	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	31
4.1	Experimente zur Kühlwirkung von Pflanzenbeständen	31
4.1.1	Wetterverlauf	31
4.1.2	Pflanzenentwicklung	31
4.1.3	Biomasseproduktion	35
4.1.4	Wasserretention	38
4.1.5	Evapotranspiration	42
4.1.6	Perkolatqualität	45
4.1.7	Bodentemperaturen	47
4.1.8	Thermographie	52
4.2	Gewächshausexperimente mit ausgewählten Pflanzenarten	56
4.2.1	Keimtests und Bestimmung der relativen Wachstumsraten	56
4.2.2	Austrocknungsversuche	57
4.2.3	Thermographie	60
4.2.4	NIR-Spektren	63
5	GESAMTDARSTELLUNG UND AUSBLICK	66
5.1	Hintergrund	66
5.2	Methodik	66
5.3	Ergebnisse	67
5.4	Gesamtfazit	70
5.5	Empfehlungen und Ausblick	71
6	LITERATUR	74

Zusammenfassung

Es wird allgemein davon ausgegangen, dass grüne Infrastrukturen die mit dem Klimawandel erwarteten häufigeren Starkregenereignisse abpuffern, da sie die Abflussmengen bzw. -spitzen verringern und zeitlich verlagern können. Das in der Vegetationsschicht gespeicherte Niederschlagswasser kann anschließend über die Pflanzen transpiert werden, so dass es zu einer Abkühlung der Umgebung kommen kann. Im Rahmen des Programms KLIMOPASS Teil 2 der LUBW wurde durch das Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie der Universität Hohenheim unter Beratung des Deutschen Dachgärtner Verbands (DDV) ein Pilotprojekt zur Klimawirksamkeit der Dachbegrünung etabliert.

Gegenstand der einjährigen Untersuchung war die extensive Dachbegrünung, der nur wenige Zentimeter hohen Sedum-Gras-Vegetation, welche immer mehr zur Begrünung von Neubauten eingesetzt wird. Obwohl solche Maßnahmen in der Novelle der Landesbauordnung vorgesehen sind, gibt es erheblichen Forschungsbedarf zur optimalen Ausführung von Dachbegrünungen. In der praxisnahen Studie ging es um artspezifische Unterschiede des Wasserrückhalts, der Evapotranspiration und der Kühlwirkung sowie um Zusammenhänge zwischen Wasserretention, Wachstum und den über die Zeit steigenden Deckungsgraden der Vegetationsschicht. Über einen Zeitraum von einem Jahr erfolgten kontinuierliche Messungen der Bodentemperaturen, wöchentliche Bestimmungen der Wasserretention und Evapotranspiration sowie diskontinuierliche Messungen der Oberflächentemperaturen mittels Infrarotthermographie. Für den Versuch wurden fünf häufig zur Dachbegrünung verwendete Pflanzenarten verschiedener funktioneller Typen ausgewählt: Blaues Sandschilfgras (*Koeleria glauca* L.), die Leguminose Hornklee (*Lotus corniculatus* L.), die Kartäusernelke (*Dianthus carthusianorum* L.), der Zwergstrauch Sandthymian (*Thymus serpyllum* L.) und die sukkulente Goldfethenne (*Phedimus floriferus* L.). Als Bepflanzungsvarianten wurden Monokulturen sowie Zwei- und Dreifachmischungen mit der Goldfethenne zu je acht Wiederholungen pro Variante kultiviert. Dabei wurden eine einheitliche Pflanzdichte von 46 Pflanzen pro Quadratmeter und ein gleicher Abstand zwischen den Pflanzen vorgegeben, um anfängliche Konkurrenzunterschiede auszuschließen.

Die Pflanzen konnten sich im Versuchszeitraum gut etablieren. Die Deckung der Vegetationsschicht stieg von ca. 10% zu Anfang des Experiments auf bis zu 100% am Versuchsende. Aufgrund der optimalen Flächen- bzw. Raumnutzung unterschiedlicher Wuchsformen wiesen die Mischungen mit flachwüchsigen Arten höhere Deckungen als die Monokulturen des horstartig wachsenden Grases und der Nelke auf. Die Präsenz der Leguminose hatte in der Zweifachmischung mit der Fetthenne einen wachstumsfördernden Effekt. Als besonders robust erwiesen sich das Gras und die Fetthenne, während im Sommer viele Individuen des Thymians und einige des Hornklee abstarben. Das längste Blühfenster zeigten die Nelke und die Goldfethenne, die stärkste Aussamung und Etablierung von Jungpflanzen war bei der Nelke zu beobachten.

Unabhängig von der Artzusammensetzung konnte die extensive Vegetation über den einjährigen Zeitraum im Mittel 30% des Niederschlagswassers zurückhalten. Wenn man nur das Sommerhalbjahr betrachtet, belief sich der Wasserrückhalt sogar auf 39%. Als besonders effektiv in ihrer Wasserspeicherkapazität erwiesen sich die Mischungen mit dem Gras und der Leguminose, während die größten Durchflussmengen in den Fetthennen-Monokulturen gemessen wurden. Interessanterweise wurde für letztere sukkulente Art auch eine gegenüber den anderen Pflanzenarten deutlich reduzierte Evapotranspirationsmenge beobachtet, die im Verhältnis dazu gebildete Biomasse war jedoch größer als bei anderen Ansätzen. Die maximal pro Schale gebildete Trockenmasse entsprach einem Wert von 427 g pro Quadratmeter.

Die in den Monokulturen kontinuierlich durchgeführten Bodentemperaturmessungen legten insgesamt nahe, dass das Substrat unter der Dachbegrünung in kühlen Jahreszeiten als Temperaturpuffer fungieren und in warmen Jahreszeiten in Abhängigkeit vom aktuellen Wassergehalt für einen Kühlungseffekt sorgen kann. Eine Bepflanzung erhöht diese Pufferwirkung. Der größte Bodenkühlungseffekt wurde für die mit Fetthennen bepflanzten Systeme registriert. Eine auf die Bepflanzung zurückgehende Kühlwirkung bestätigten auch die Messungen der Oberflächentemperaturen. Diese lagen für bepflanzte Systeme im Mittel etwa 5°C unter denen der unbepflanzten Kontrollen. Zudem zeigte sich, dass die Bestände mit höheren Deckungsgraden kühler waren. Zwischen den Pflanzvarianten konnten nur geringe Unterschiede festgestellt werden. Die mit dem Gras und der Leguminose ausgestatteten Mono- und Mischkulturen waren im Mittel aber etwas kühler als die aus anderen Arten aufgebauten Systeme. Eine hohe Deckung gekoppelt mit niedrigeren Temperaturmitteln und einer moderaten Evapotranspirationsrate war durchweg bei den Mischungen mit der Leguminose und der Fetthenne zu beobachten.

Basierend auf diesen Ergebnissen erweisen sich Bestände mit hohen Deckungsanteilen der Goldfetthenne als nicht optimal geeignet, Wasser im Substrat zu speichern. In Mischung gepflanzt, beispielsweise mit dem besonders robusten Sandschillergras und der starkwüchsigen Leguminose Hornklee, für welche die höchste Niederschlagsretention, Evapotranspiration und eine hohe Kühlleistung verzeichnet wurden, können jedoch positive Effekte auf den Gesamtwasserhaushalt und eine lang andauernde Kühlwirkung erzielt werden. Es bestätigt sich damit, dass aus mehreren Arten aufgebaute Systeme bessere ökologische Dienstleistungen als einfach aufgebaute Bestände ermöglichen. Da im Experiment zwar verschiedene Lebensformen, aber nur einige gängige Arten und in gleicher Dichte gepflanzte anstatt ausgesäeter Bestände untersucht wurden, ist nicht auszuschließen, dass es besser geeignete Pflanzenmischungen und Etablierungsmethoden gibt, die zu einer Optimierung der Wasserretention, Kühlleistung, Attraktivität, Langlebigkeit und Biodiversität führen können. Letztlich kann aber nur die regelmäßige Pflege von extensiven Dachbegrünungen eine dauerhafte Kombination dieser Funktionen ermöglichen.

Basierend auf den Ergebnissen des Projekts empfiehlt sich bei der Neuanlage von extensiven Dachbegrünungen die Nutzung von Flachballenpflanzen robuster und langlebiger Arten z.B. eines horstartig wachsenden Grasses und einer flachwüchsigen sukkulenten Art. So können sich die Pflanzen zügig etablieren und zu einem günstigen Mikroklima und einer guten Niederschlagsretention beitragen. Die Arten sollten zu etwa gleichen Anteilen als Grundgerüst mit einer Pflanzdichte von nicht mehr als 20 Pflanzen pro Quadratmeter verwendet werden. Zur Erhöhung der Deckung und der Förderung von Niederschlagsretention und Evapotranspiration empfiehlt es sich, krautige Arten in dieses Grundgerüst einzubringen. Die Nutzung von Leguminosen kann sich im Bestand vorteilhaft auf die Ressourcenverfügbarkeit (N-Fixierung) auswirken.

Die langfristige Entwicklung und Sukzession konstruierter Dachbegrünungen ist geprägt von sich in den Beständen etablierenden höheren Pflanzen, Flechten und Moosen. Erste Untersuchungen in Deutschland ergaben aber, dass es bei Ausbleiben einer regelmäßigen Pflege zur Verfilzung der Bestände und einer Artenverarmung der Gründächer kommen kann. Es sollten daher weitere Begleituntersuchungen zur Ökologie, Botanik und Klimawirksamkeit älterer Dachbegrünungen und zu Möglichkeiten der Revitalisierung durchgeführt werden, aus denen grundlegende Erkenntnisse für die Dachbegrünungspraxis und den innerstädtischen Naturschutz gezogen werden können.

1 Einleitung

In den vergangenen Jahrzehnten wurden in Mittel- und Nordeuropa viele Dachflächen begrünt, wobei oftmals ästhetische Aspekte und weniger die ökologischen Funktionen im Vordergrund standen. Trotz vorhandener Gestaltungsrichtlinien (FLL 2008) und der Nutzung standardisierter Substrataufbauten, gibt es oft gravierende Unterschiede bei der Zusammensetzung, der Pflege und der langfristigen Entwicklung (Sukzession) der auf dem Dach etablierten Vegetation. Schlecht gepflegte Bestände können in nur wenigen Jahren stark an Arten verarmen, ihre gestalterische Attraktivität verlieren und zudem eine Verringerung der Niederschlagsretention aufweisen. Obwohl es nur wenige repräsentative langfristige Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung (z.B. Thuring & Dunnett 2014), Wasserspeicherung und der damit verbundenen Abflussverringering von begrüntem Dächern und des Beitrags bestimmter Pflanzenarten und –mischungen gibt, identifiziert eine Studie des Umweltbundesamts die Anlage von Gründächern als eine der 28 „no regret“ Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel (Tröltzsch et al. 2012). Die vermutete positive Wirkung von Gründächern, selbst den nur 10-15 cm hohen Extensivdachbegrünungen, auf das Mikro- und Mesoklima im Umfeld von Gebäuden und Siedlungsbereichen sowie den Wasserrückhalt an der Dachoberfläche hängt von vielen Faktoren ab und dürfte bei längerer Trockenheit nicht mehr nachweisbar sein.

Nichtsdestotrotz werden in Deutschland seit vielen Jahren Gebäude mit Dachbegrünungen ausgestattet, wobei zunächst gestalterische Erwägungen eine größere Rolle spielten. In den letzten Jahren rückte jedoch das ökologische Potenzial besonders der städtischen Grünflächen in den Vordergrund. So wurden in Stuttgart im Rahmen des Klimawandel-Anpassungskonzepts KLIMAKS Dachbegrünungen als eine der hocheffektiven Maßnahmen identifiziert (Landeshauptstadt Stuttgart 2013). Zudem rief auch das Ministerium für Verkehr und Infrastruktur (MVI) Baden-Württemberg mit der Initiative „Mittendrin ist Leben. Grün in Städten und Gemeinden in Baden-Württemberg“ Kommunen und Privatleute dazu auf, durch die Schaffung oder Konzeption neuer Grünflächen zur Verbesserung der funktionellen und ökologischen Qualität der Städte beizutragen. Seit Juni 2014 ist auch die Anlage einer Dachbegrünung im Rahmen einer energieeffizienten Sanierung über die KfW förderfähig. In Baden-Württemberg sieht schließlich die am 5.11.2014 verabschiedete Novelle der Landesbauordnung eine Verpflichtung zur Begrünung bei Neubauten vor. Besonders die Einführung gesplitteter Abwassergebühren für Niederschlags- und Schmutzwasser dürfte es aber für Gebäudebesitzer in Zukunft in jedem Fall attraktiver machen, mehr Dachflächen zu begrünen, da dadurch die Abflussbeiwerte und damit die Niederschlagswassergebühren gesenkt werden können (DDV 2011).

Die Anlage von Dachbegrünungen zielt vorrangig auf urbane Ballungsgebiete, deren Bevölkerung bereits heute mit den nachteiligen Wirkungen der Sommerhitze auf die Gesundheit, das Wohlbefinden, die Leistungsfähigkeit und die Lebensqualität konfrontiert ist. Dabei wird die zunehmend alternde Bevölkerung stärker durch Sommerhitze betroffen sein als jüngere Altersgruppen. Im Rahmen des KLARA-Projekts (Klimawandel, Auswirkungen, Risiken und Anpassung) wurde auf der Basis von PIK-Szenarien ermittelt, dass sich die Vulnerabilität der Bevölkerung Baden-Württembergs gegenüber Hitze im Mittel über alle Kreise um 20% erhöhen wird. Mit der Zunahme von Hitzewellen wird demnach bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts im Vergleich zur Referenzperiode (1950 bis 2000) mit 180 bis 400 zusätzlichen Todesfällen pro Jahr zu rechnen sein (Stock 2005). Auch Hübler & Klepper (2007) vom Institut für Weltwirtschaft Kiel beschäftigten sich mit der Erhöhung der Mortalität infolge des Klimawandels. Unter Berücksichtigung aller IPCC-Szenarien wird es im Laufe des 21. Jahrhunderts in Südwestdeutschland eine starke Zunahme der Anzahl der Sommertage (Tagesmaximum >25°C) von 25 Tagen geben. Eine noch höhere Zunahme der Zahl der Sommertage um

32.3 Tage für die ferne Zukunft (2071-2100) bzw. eine Zunahme der Zahl von Tropennächten (Mittel $>20^{\circ}\text{C}$) um 7.7 Tage wurde in der bislang detailliertesten Untersuchung zum Klima Baden-Württembergs (LUBW 2013) ermittelt. Laut den in Hübler & Klepper (2007, Abb. 17) dargestellten Ergebnissen wird allein in den besonders betroffenen Ballungsräumen Stuttgart und Mannheim bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit im Mittel 60 zusätzlichen hitzebedingten Todesopfern pro Jahr zu rechnen sein. Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit der Situation im heißen Sommer 2003, in dem es in Baden-Württemberg ca. 1100 Hitzeopfer und 7000 in ganz Deutschland gab.

Da der Südwesten gegenwärtig bereits eine der wärmsten Regionen Deutschlands ist und sich im Zuge des Klimawandels vor allem in den städtischen Ballungsgebieten negative Effekte der Temperaturerhöhung auf das menschliche Wohlbefinden (Bioklima) bemerkbar machen werden, sollte Baden-Württemberg eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung und Planung einer an den Klimawandel angepassten und klimaverbessernden Baustruktur inklusive der Förderung von Dachbegrünungen übernehmen. Obwohl es bereits einige Langzeitbeobachtungen und Messungen *in situ* gibt, wurde bislang nur wenig zur Kühlleistung und Niederschlagsretention bestimmter Arten und Pflanzenmischungen in der extensiven Dachbegrünungsvegetation geforscht. Das diesem Bericht zugrunde liegende Projekt zielte auf die systematische Erfassung dieser Effekte ab, wobei verschieden zusammengesetzte Vegetationen in eigens etablierten, repräsentativen Kleinbeständen miteinander verglichen werden sollten.

2 Kenntnisstand

2.1 GESCHICHTE DER DACHBEGRÜNUNG

Das Begrünen von Dächern oder Fassaden ist kein Gestaltungselement moderner Architektur. Vermutlich wurden schon vor ca. 5000 Jahren die Flachdächer altägyptischer Bauten u.a. als Gärten und zur Pflanzenkultivierung genutzt. Die wohl berühmteste Gebäudebegrünung aus der Vergangenheit sind die Hängenden Gärten von Babylon (um ca. 700 v. Chr.). Grassoden bzw. Torfsoden wurden auch in Europa bereits seit dem frühen Mittelalter dazu verwendet, Dächer zu decken und gleichzeitig von der temperatenausgleichenden Wirkung der Soden auf extreme Hitze oder Kälte im Innenraum des Gebäudes zu profitieren. In europäischen Städten führte ein zunehmender Platzmangel im 16.-18. Jahrhundert zur Verlagerung der gewünschten Grünfläche auf die Dächer. Der Durchbruch der Dachbegrünung in Europa und Amerika geht jedoch auf die Erfindung des Holzzementdaches, dem Vorläufer des heutigen Flachdaches, im 19. Jahrhundert zurück. Ermöglicht durch diese preiswerte und stabile Unterkonstruktion wurden nun nicht mehr nur die Bauten der Reichen, sondern auch Wohnhäuser und industriell genutzte Gebäude begrünt. Die einfache und günstige Errichtung von großen Dachgärten mit einer dicken Erdschicht wurde aber erst mit Einführung des Eisenbetons Anfang des 20. Jahrhunderts möglich. Zunächst nur von einzelnen Architekten experimentell erprobt, etablierte sich der Bau von Dachgärten in den dreißiger Jahren und hat sich seitdem im Wesentlichen nicht mehr verändert (Ahrendt 2007).

Das ökologische Potential eines Gründaches rückte in Deutschland mit der Welle der Grünen Politik in den 70er Jahren gegenüber dem reinen Nutz- und Genussaspekt in den Vordergrund. Dies war auch die Geburtsstunde der extensiven Dachbegrünung, die hinsichtlich des Aufwands bei der Anlage und Pflege, sowie in Bezug auf Substrat- und Pflanzenkombinationen von intensiven Systemen unterschieden wird (BUWAL 1995; Kolb & Schwarz 1999; FLL 2008). Ab dem Jahr 1982 gab es von der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL 2008) herausgebrachte Regelwerke und Richtlinien zur Anlage von Gründächern. Im Hinblick auf Sicherheit und Qualität werden seither kontinuierlich verbesserte Systemlösungen für den Dachaufbau entwickelt.

2.2 DACHBEGRÜNUNG IN DEUTSCHLAND

Lowitt & Peck (2008) und die US amerikanische Umweltbehörde EPA (2008) gehen davon aus, dass in Deutschland, der vermutlich weltweit führenden Nation bei der Dachbegrünung, bereits 15% aller Flachdächer begrünt sind. In Nordamerika und vielen Ländern Europas sind dagegen die ökologischen und ökonomischen Vorteile begrünter Dächer noch nicht allgemein bekannt. Häufig fehlt es an Qualitätsstandards und Ausführungsrichtlinien. Auch die Förderung begrünter Dächer durch Kommunen wird in anderen Ländern nicht so umfassend betrieben wie in Deutschland. Eine Übersicht zu den momentan in Deutschland durchgeführten „best practice“ Projekten zur Schaffung einer „grünen und blauen Infrastruktur“ inklusive Dachbegrünung geben Wittig & Schuchardt (2013) und das Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass) am Umweltbundesamt.

Allein in Stuttgart gibt es mehr als 2 Millionen m² begrünte Dächer und Tiefgaragen (Ansel 2012). Davon befinden sich 120.000 m² Dachbegrünungen auf städtischen Gebäuden, 62.000 m² wurden von 1986-2008 im Rahmen eines kommunalen Förderprogramms unterstützt (Döveling 2009).

Ein Leitfaden „Dachbegrünung für Kommunen“ wurde vor kurzem im Rahmen eines Projekts der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) vom Deutschen Dachgärtner Verband (DDV), der HafenCity Universität Hamburg und der Deutschen Gartenamtsleiterkonferenz erarbeitet (Ansel et al. 2011). Darin geht es vorwiegend um die Beschreibung der kommunalen Förderinstrumente und ihrer Kombinationsmöglichkeiten. Des Weiteren werden Qualitätskriterien für die Verbesserung der ökologischen Funktionen extensiv begrünter Dächer beschrieben. Die Begrünung von Dächern kann im Rahmen der Bauleitplanung über verschiedene Maßnahmen gefördert werden. Besonders die mit dem Urteil des Verwaltungsgerichtshofes Mannheim seit dem Jahr 2010 verbindliche Einführung der gesplitteten Abwassergebühren für Niederschlags- und Schmutzwasser in Baden-Württemberg macht es für Gebäudebesitzer attraktiv, Dachflächen zu begrünen, da dadurch die Abflussbeiwerte und damit die Niederschlagswassergebühren gesenkt werden können. Je nach Aufbaudicke des Substrats verringern sich die Abflussbeiwerte, so dass mehr Niederschlag im Gründach verbleibt und es zu einer Verzögerung des Spitzenabflusses kommt. Eine beispielhafte Zusammenstellung der Förderinstrumente für die Stadt Karlsruhe findet sich bei Kern (2009).

Zu Beginn des Jahres 2014 haben die Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V. (FBB) und der NABU mit der Unterstützung des Deutschen Städtetags eine bundesweite Umfrage an rund 1500 Städte mit über 10.000 Einwohnern gerichtet, in der direkte und indirekte Fördermöglichkeiten von Dach- und Fassadenbegrünungen abgefragt wurden. Aus den rund 500 Rückmeldungen ging hervor, dass bereits bei 79% dieser Städte eine gesplittete Abwassersatzung geplant bzw. schon umgesetzt ist, bei 39% der Städte Bebauungspläne, die Dachbegrünungen beinhalten vorhanden sind, bei über der Hälfte dieser Städte indirekte Fördermittel zur Dachbegrünung bei gesplitteter Abwassersatzung zur Verfügung stehen, jedoch nur bei 6% die Dachbegrünung bereits direkt gefördert wird (FBB 2014).

Konkrete Pläne zur Identifikation und Schaffung neuer Gründachflächen entwickelte erst jüngst - als erste Stadt Deutschlands - Hamburg. Ziel der vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) als Pilotprojekt geförderten „Gründachstrategie“ ist es, als eine Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel die deutliche Zunahme der Gründachflächen in der Stadt zu bewirken. Ab Anfang 2015 bis 2019 werden dazu die Neuanlage eines Gründaches bzw. der Umbau oder die Sanierung von bereits vorhandenen Dachflächen bezuschusst. Zudem soll bereits in der Planungsphase bei klimaschonendem Bauen ein verstärkter Fokus auf die Dachbegrünung gelegt werden. Wissenschaftlich begleitet wird das Projekt von der HafenCity Universität (Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt 2014; BMUB 2014).

2.3 EXTENSIVE DACHBEGRÜNUNG

Im Gegensatz zu intensiven Systemen (z.B. Dachgärten mit Sträuchern, Bäumen und/oder Kulturpflanzen), die aufgrund ihres höher geschichteten Substrats deutlich schwerer sind und ggf. zusätzlich beregnet und gedüngt werden müssen, haben die gängigsten extensiven Systeme eine Substratschichtung von lediglich 6-20 cm und ein Gewicht zwischen 60 bis maximal 200 kg pro Quadratmeter (DDV 2011). Die hierfür eingesetzten Substrate (Ziegelgranulate, Blähton, Lava- und Bimsgranulate) sind zumeist locker und dünn geschichtet und haben nur ein begrenztes Wasser- und Nährstoffspeichervermögen. So eignen sich zur

Begrünung extensiver Systeme prinzipiell Arten der Felsfluren, Hochgebirge und Halb- und Sandtrockenrasen. Es werden ca. 50 Pflanzenarten eingesetzt, die sich aus ökologischer Sicht durch eine ausgesprochene Lichtbedürftigkeit, hohe Thermophilie und Trockenresistenz auszeichnen (s. Tabelle 17 in Kolb & Schwarz 1999; DDV 2011). Bei den Pflanzenarten handelt es sich zumeist um ausdauernde und langlebige Arten aus einheimischen Gesellschaften, es werden aber auch nichtheimische Arten z.B. aus Halbwüsten verwendet. In der Praxis erfolgt eine Bepflanzung üblicherweise mit Mischungen aus kurzwüchsigen Gräser- und Sedumarten. Eine Auflistung der im Mittelmeerraum zur Dachbegrünung einsetzbaren potentiellen Arten gibt Caneva et al. (2013).

Nach den Untersuchungen von Mann (1996), Baumann (2006) und Gedge & Kadas (2005) ist eine Bepflanzung bzw. Ansiedlung mit Gräsern und Kräutern nicht nur aufgrund ihres floristischen Potentials wünschenswert, sondern auch weil sie komplexe Habitats für Tiere und Insekten bereithalten.

Die Anpflanzung heimischer Arten erwies sich in verschiedensten Studien (z.B. Wilsey et al. 2009) als empfehlenswert, da hierdurch der Artenreichtum über die längste Zeit aufrechterhalten werden konnte. Eine Übersicht über die potentiellen Vorteile einer biodiversen Begrünung auf Dächern stellten Cook-Patton & Bauerle (2012) zusammen.

Allgemein gilt in der Pflanzenökologie das Theorem, dass komplexere ökologische Systeme besser als Monokulturen geeignet sind, ökologische Dienstleistungen zu erbringen, da sie stabiler und resilienter sein sollen und die knappen Ressourcen (im Falle der Gründächer Wasser und Nährstoffe) besser ausnutzen können. So sind vermutlich Bestände mit mehreren Arten auch besser geeignet, das eingehende Wasser effektiv zu nutzen und das Mikroklima günstig zu beeinflussen (Dvorak & Volder 2010; Lundholm et al. 2010). In günstigen Situationen (z.B. in regenreichen Sommern) können sich ggf. neue Pflanzenarten etablieren und das Dachökosystem bzw. das Mikroklima nachhaltig modifizieren. Über die langjährige Akkumulation von toter Biomasse und Humus kann das Wasserspeichervermögen zusätzlich erhöht werden. Auf der anderen Seite besteht aber auch die Gefahr, dass in trockenen Jahren viel Biomasse abstirbt und sich die ggf. frei liegende, dunkle Humusschicht stark aufheizt.

Das Schema in Abbildung 1 verdeutlicht, welche ökologischen, mikroklimatischen, umweltrelevanten und biodiversitätsfördernde Funktionen extensive *Sedum*-Gras-Mischungen neben ihrer Attraktivität in Dachbegrünungen übernehmen können bzw. welche Faktoren bei der Kühlwirkung eine Rolle spielen.

Extensive Dachbegrünungen, die neben Kräutern und Gräsern auch viele Flechten und Moose enthalten, sind vermutlich besser gegen Trockenheit geschützt als auf nur wenigen Arten basierende Systeme. Da Städte aufgrund der verbesserten Luftqualität mittlerweile keine ausgesprochenen Flechten- und Mooswüsten mehr sind, lässt sich heute auch ein hoher Anteil niederer Pflanzen in Dachökosystemen realisieren. Die Flechten und Moose können zwar nicht aktiv in die Vegetation eingebracht werden, siedeln sich aber nach einigen Jahren von selbst an (z.B. Emilsson 2008).

Der jährliche Zuwachs bzw. die Biomasseproduktion der extensiven Dachbegrünung ist generell gering bzw. soll auch gering sein, um keinen zu dichten Vegetationsfilz aufzuhäufen und damit die Wasserleitfähigkeit negativ zu beeinflussen. Auch aus Gründen der Pflegeintensität und der maximalen Gewichtsbelastung der Dächer ist ein starker Zuwachs der Pflanzenmasse bei extensiven Dachbegrünungen nicht erwünscht. Es kann davon ausgegangen werden, dass in extensiven Systemen je nach Zusammensetzung und auch in niederschlagsreichen Jahren deutlich unter 100 g Trockenmasse pro Quadratmeter und Jahr produziert werden.

Systematische Untersuchungen liegen aber auch hier nicht vor. Die Ausprägung einer vitalen und dichteren Vegetationsschicht wirkt sich positiv auf die Kohlenstoffsequestrierung, die Ansiedlung weiterer Arten und die Fähigkeit der Vegetation aus, Schadstoffe dauerhaft im System zu akkumulieren.

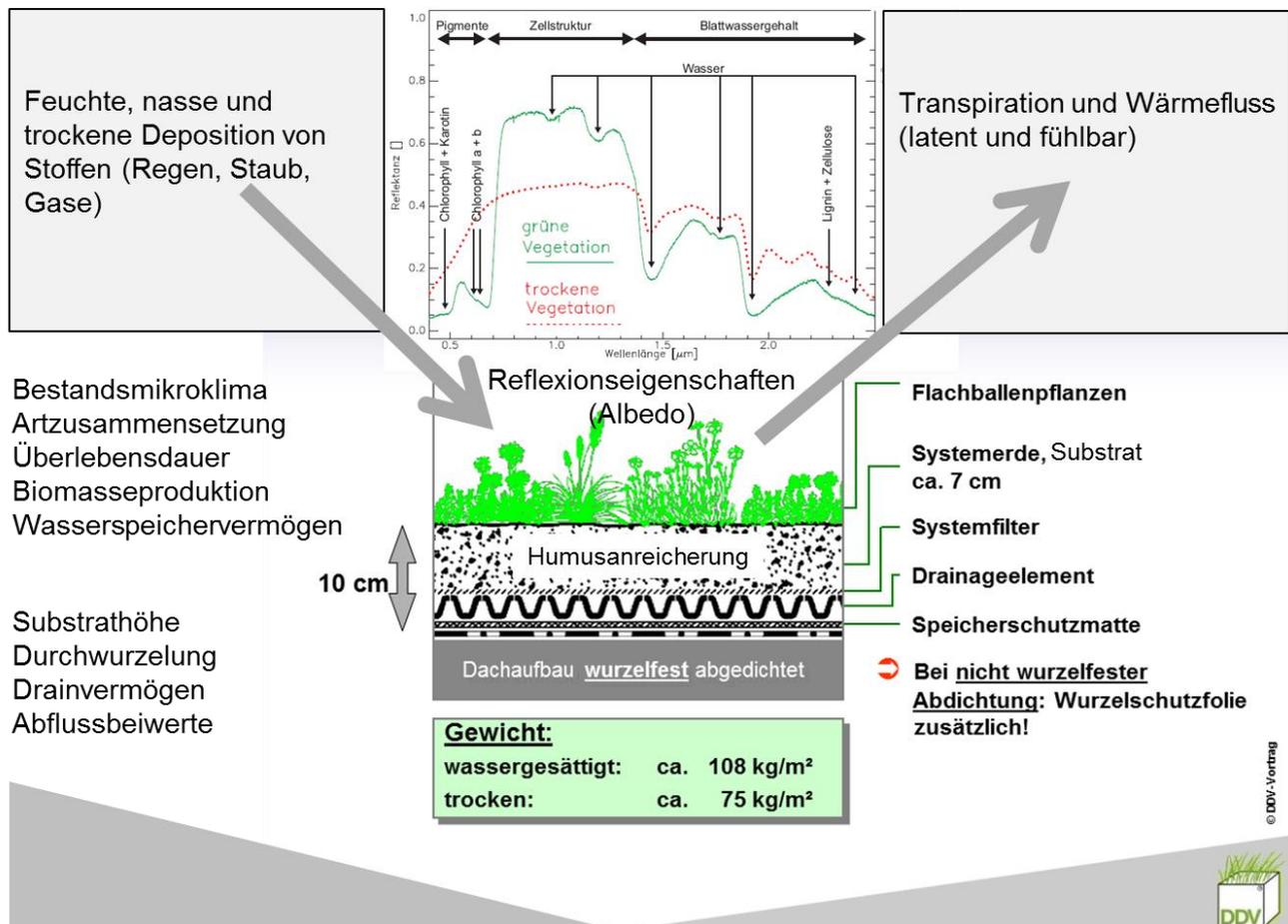


Abbildung 1. Bedeutung von abiotischen und biotischen Faktoren bei der Kühlwirkung, Wasserspeicherung und der Ökologie der Dachbegrünung. Hintergrundschema zum Standardaufbau „Extensivbegrünung“ nach Deutscher Dachgärtner Verband (DDV, pers. Mitteilung). Bild des Reflexionsspektrums grüner und trockener Vegetation in der Mitte oben nach Bach (1995) und VDI (2001).

Prinzipiell ist davon auszugehen, dass mit der Aufbringung von bestimmten Substraten und Saadmischungen auf Flachdächern eine pflanzliche Sukzession in Gang gesetzt wird, bei der über die Zeit Veränderungen in der pflanzlichen Deckung und den thermischen Eigenschaften ablaufen. Bestimmte Arten werden ggf. nach einigen Jahren komplett ausbleiben, wohingegen andere einheimische und nicht einheimische Arten ggf. nach einigen Jahren einwandern werden. Köhler (2006) beobachtete die Entwicklung von Pflanzenkompositionen auf extensiven Gründächern in Berlin über eine Zeitspanne von 20 Jahren. Die im Jahre 1985 angelegte Begrünung erfolgte mit 10 Arten. In 20 Jahren wurden insgesamt 110 verschiedene Arten bestimmt, jedoch wurden nur 10 bis 15 Arten ausgemacht, die über eine lange Zeit dominierten. Als besonders dominant erwiesen sich in dieser Langzeitstudie *Allium schoenoprasum*, *Festuca ovina*, *Poa compressa*, und *Bromus tectorum*. In der Untersuchung von Thuring & Dunnett (2014) zur Entwicklung von 20 Jahre alten Gründächern in Südwestdeutschland konnten insgesamt 89 Arten nachgewiesen werden, obwohl es trotz ähnlichen Anfangsbedingungen große Unterschiede in der floristischen Ausstattung gab. Am häufigsten wurde das Gras *Festuca ovina* (L.) und *Sedum hybridum* gefunden, wohingegen andere typische Arten wie *Thymus spec.* und *Dianthus spec.* eher selten waren.

Für Städte sind Dachbegrünungen besonders hinsichtlich ihrer ökologischen Funktionalität sowie ihrem Potenzial, das Mikroklima wesentlich zu beeinflussen attraktiv. Methodische Aspekte der systematischen Untersuchung dieser botanisch oftmals interessanten Vegetation wurden von Dvorak & Volder (2010) für Städte Nord-Amerikas in einem Übersichtsartikel zusammengestellt.

Im Gegensatz zu ländlichen Gegenden herrschen in großen Städten und deren Vororten meist weitaus höhere mittlere Lufttemperaturen. Nach Untersuchungen von Oke (1997) beträgt dieser Unterschied bei einer Stadt mit einer Million Einwohnern um bis zu 3°C, in der Nacht sogar noch mehr. Das Phänomen dieses Temperaturunterschiedes wird als städtischer Wärmeinseleffekt (*urban heat island*) bezeichnet und beruht auf der Absorption kurzweiliger solarer Strahlung und der thermischen Emission langweiliger Strahlung. Je geringer die Absorption, desto höher ist die Albedo (das Rückstrahlungsvermögen selbst nicht leuchtender Objekte). Je höher die Albedo, desto weniger stark wird die Luft um die Objekte herum erwärmt. Die Albedo vegetativer Oberflächen ist im Allgemeinen größer als beispielsweise die von Straßen oder Ziegeldächern. So wird das stark dezimierte Vorhandensein von Grünflächen in Städten neben den Materialeigenschaften von Straßen und Gebäuden, deren geometrischen Anordnung, sowie anthropogen verursachten Wärmeausstößen beispielsweise durch Klimaanlage, Verkehr und Heizungen als eine der Hauptursachen für den städtischen Wärmeinseleffekt angesehen (EPA 2008).

Der städtische Wärmeinseleffekt kann durch Begrünungen jeder Art gemindert werden. Im Siedlungsraum bieten vor allem Dächer vielfach ungenutzte Flächenreserven für die Schaffung von Grünflächen und können dazu beitragen stadtklimatische Defizite in Bezug auf den Feuchtigkeitshaushalt und das thermische Milieu zu mindern (Landeshauptstadt Stuttgart 2010). Über die Verdunstung des im Gründach gespeicherten Niederschlagswassers und die Photosynthese der Pflanzen wird Strahlungsenergie abgebaut, wodurch ein Kühleffekt entsteht und die oberflächennahe Umgebungsluft angefeuchtet wird. In der Fläche kann sich dies dann positiv auf das Bioklima auswirken. Basierend auf mehreren Modellstudien nennt Santamouris (2012) eine Temperaturspanne zwischen 0,3°C und 3°C, um welche die Lufttemperatur in Städten durch Dachbegrünung gesenkt werden könnte.

Eine vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebene Studie (Tröltzsch et al. 2012) benennt die Anlage von Gründächern als eine sogenannte „no regret“ Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel, da eine Dachbegrünung neben der Verminderung der städtischen Überhitzung zur Lebensverlängerung der Dächer und zu positiven Effekten auf die Biodiversität und das Mikroklima führt. Auch in Stuttgart wurden Dachbegrünungen im Rahmen des Klimawandel-Anpassungskonzepts KLIMAKS als eine hocheffektive Maßnahme identifiziert (Landeshauptstadt Stuttgart 2013).

Es gibt aber auch Überlegungen und Ansätze, eine Kühlwirkung in Städten durch den Einsatz von Materialien mit einer höheren Albedo zu erzielen. So werden vom Cool Roof Rating Council (CRRC) seit kurzem hellfarbige Dächer zertifiziert, die zwar eine starke Reflektion kurzweiliger solarer Strahlung, jedoch keine Speicherung des kühlend wirkenden Niederschlags ermöglichen. Im Gegensatz zur passiven, allein aufgrund der durch die Reflexion erreichten Kühlwirkung, können Bauwerksbegrünungen zusätzlich durch das Wasserspeichervermögen einer Substratschicht einen aktiven Beitrag leisten, da der Transpirationsfluss so auch über niederschlagsarme Perioden aufrechterhalten werden kann.

Die Funktion der Wasserretention von Dachbegrünungssystemen ist besonders auch bei den mit dem Klimawandel zukünftig in größerer Frequenz zu erwarteten Starkregenereignissen und der vermehrten Gefahr von Hochwassersituationen von Bedeutung. Das Wasserspeichervermögen wird neben dem Alter und der Neigung des Daches, der Art der Bepflanzung und des Substrats, besonders von der Mächtigkeit des Substrats und dem aktuellen Wassergehalt beeinflusst. Exakte Angaben sind schwierig, da sich vorhandene Studien aufgrund verschiedener Ausgangs- und Witterungsbedingungen kaum vergleichen lassen. Gemäß der Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen liegt bei Substratstärken zwischen 250 mm und 500 mm die mittlere Wasserretention bei etwa 70% (FLL 2008). Im Idealfall können jedoch schon Substratstärken von lediglich 8-12 cm ausreichend sein, um 50-90% des Niederschlags zu speichern (Ansel 2011). Laut einem Übersichtsartikel von Czemieli Berndtsson (2010) lag die Retentionsleistung bei Studien zum Wasserspeichervermögen extensiver Dachbegrünung zwischen 30 % und 86%. Mentens et al. (2006), die deutsche Studien von 1987 bis 2003 zusammenfassten, berichten von jährlichen Rückhaltevermögen zwischen 75% für intensive Dachbegrünung (mittlere Substrattiefe: 150 mm) und 45% für Extensivbegrünungen (mittlere Substrattiefe: 100 mm).

Einigkeit herrscht im Allgemeinen über die inverse Korrelation zwischen Retentionsrate und Niederschlagsintensität. Bei leichtem Nieselregen kann die Retention bis zu 100% betragen, wohingegen bei Starkregenereignissen die Retentionsleistung schon nach wenigen Minuten stark absinkt (Carter & Rasmussen 2006; Simmons et al. 2008; Fang 2010). Eine effektive Retention ist im Besonderen bei Regenereignissen von weniger als 10mm gegeben (VanWoert et al. 2005; Teemusk & Mander 2007; Simmons et al. 2008; Burszta-Adamiak 2012; Fassman-Beck et al. 2013). Pitha et al. (2012) und Lee et al. (2013) jedoch zeigten, dass dünnsschichtige Gründächer schon bei Regenereignissen von mehr als 20 mm Niederschläge nicht mehr ausreichend aufnehmen und zwischenspeichern können. Allerdings sind solche Regenereignisse momentan noch selten. Zudem verweisen andere Studien (z.B. Villarreal & Bengtsson 2005; Mentens et al. 2006) darauf, dass nicht nur die absolute Niederschlagsmenge betrachtet werden darf, sondern auch die zeitliche Verteilung und Intensitätsvarianzen eine Rolle bei der Retention spielen. Connop et al. (2013) verglichen die Wasserretention von *Sedum*-Monokulturen mit sogenannten „Biomimikri-Gründächern“, die aus angesäten biodiversen Beständen bestehen. Ziel des im TURAS-Projekt in Ost-London durchgeführten Experiments war es zu prüfen, ob komplexere Pflanzenmischungen genauso gut wie Standard-*Sedum*-Ausführungen (off-the-shelf) befähigt sind, Starkregenereignisse abzupuffern. Tatsächlich wies in diesem Versuch die komplexe Vegetation eine höhere Wasserretention als die *Sedum*-basierte Vegetation auf.

Mit dem Eintrag der über den Niederschlag in Dachbegrünungen eingetragenen Stoffe, deren Retention und Auswaschung beschäftigten sich unter anderen Gregoire & Clausen (2011), Seidl et al. (2013) und Speak et al. (2014). Während junge Systeme zunächst als Senke für die eingetragenen Stoffe fungieren, können aus alten Systemen die festgelegten Schwermetalle mitunter wieder ausgewaschen werden. Auch der Austrag von Kohlenstoff in gelöster Form (DOC) und Phosphor kann eine größere Rolle spielen. Rowe (2011) hingegen folgert aus einer Vielzahl an Studien, dass meist die größte Schadstoffbelastung im Abflusswasser bei neuen Systemen gefunden wird, dagegen alte, etablierte Systeme die Qualität des Wassers durch Absorptions- und Filterprozesse des Substrats sogar verbessern. Diese konträren Ergebnisse müssen vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass die Wasserqualität neben dem Alter des Daches auch von anderen Einflussfaktoren wie der Substratart und -dicke, dem Systemmaterial, der Bepflanzung, Düngemiteleinsetz, genereller Luftverschmutzung und der Intensität der Niederschlagsereignisse bei den Studien abhängt (Monterusso et al. 2004; Dunnett et al. 2008; Alsup et al. 2010). Im Vergleich mit konventionellen Dächern jedoch, stellten verschiedene Autoren (Van Seters et al. 2009; Gnecco et al. 2013) geringere Stofffrachten im Abfluss von begrünten Dächern fest, was den Vorflutern insgesamt zu Gute kommen dürfte.

Je nach Art der Bepflanzung können Dachbegrünungen in Ballungsräumen mit verminderter Luftqualität auch einen aktiven Beitrag zur Verringerung von gasförmigen und partikelförmigen Luftschadstoffen leisten. Yang et al. (2008) ermittelten anhand eines „*big leaf*“ Depositionsmodells für die Stadt Chicago, dass durch die Anlage von ca. 20 ha Gründächern die Ozonkonzentrationen halbiert und die PM10-Werte um 14% abgesenkt werden können. Baik et al. (2012) konnten mithilfe einer computergestützten Simulation aufzeigen, dass die Begrünung von Dächern einen Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität in der Nähe von Straßen bzw. in Straßenschluchten leisten kann, wobei jedoch die vorherrschende Windrichtung einen großen Einflussfaktor darstellt. Li et al. (2010) konnten in ihren Studien zeigen, dass eine Dachbegrünung aufgrund der von ihr betriebenen Photosynthese die CO₂ Konzentrationen in der unmittelbaren Umgebungsluft an einem sonnigen Tag um bis zu 2% senken kann.

Aus ökologisch-ökonomischer Sicht ergaben wirtschaftliche Bewertungen zur Anlage von Gründächern (Clark et al. 2008; Mullen et al. 2013), dass unter Einbezug der positiven Umwelteffekte neben den Einsparungen bei den Energiekosten (für Kühlung im Sommer) und der Reduktion der Spitzenabflusswerte, der Kapitalwert (Nettogegenwartswert) eines begrüntes Daches trotz der höheren Investitionskosten 40% unter dem eines unbegrüntes Daches liegen kann. Laut der Studie von Gaffin et al. (2010) führt die 1000 Quadratmeter große Extensivdachbegrünung auf dem Dach des Con Ed-Gebäudes in New York zu einer jährlichen Kostenersparnis von 400 \$ bei den Heizkosten und 250 \$ bei den Kosten für Air Conditioning. Die Energiekosten liegen in den USA deutlich unter den in Deutschland veranschlagten Preisen, so dass hierzulande noch größere positive Effekte entstehen dürften.

2.5 KÜHLWIRKUNG VON GRÜNDÄCHERN

Zur Isolations- bzw. Kühlwirkung von begrüntes Dächern ist bislang insgesamt nur wenig bekannt bzw. es gab nur wenige Studien, in denen diese systematisch bzw. experimentell über einen längeren Zeitraum gemessen wurde (Cameron et al. 2012, Connop et al. 2013, Santamouris 2012).

Ein gutes Beispiel zur Kühlwirkung von Gründächern im Vergleich zu unbegrüntes Dachflächen ist die österreichische Untersuchung von Scharf et al. (2012) und Scharf (2012), in der Wärmefluss, Aufheizung und Albedo verschiedener Materialien (Bitumen und Kies) in 14 verschiedenen extensiven Dachbegrünungssystemen gemessen wurden. Die stärksten Differenzen zur Umgebungstemperatur wurden erwartungsgemäß bei den unbegrüntes Flächen gefunden. Die Bitumenfläche heizte sich im Juli bis zu 40°C gegenüber der Luft auf, während der stärkste Abkühlungseffekt bei den intensiven Begrünungssystemen beobachtet wurde. Letztere haben eine Aufbauhöhe von 30 cm und können 137 L Wasser pro Quadratmeter speichern. In der Untersuchung von ZinCo (2011) wurde gezeigt, dass eine Dachbegrünung an den Unterkanten von Solarmodulen eine Kühlwirkung von im Mittel 8°C gegenüber nicht begrüntes Flächen erbringt, wodurch die Effizienz der Photovoltaikanlagen deutlich erhöht werden kann. Zur Eignung einer gleichzeitigen Nutzung von Gründächern und Solaranlagen siehe auch Zebe (2012).

Gründächer sind insgesamt effektiver bei der Vermeidung einer sommerlichen Aufheizung als bei der Verringerung eines winterlichen Wärmeverlusts. In der Studie von Jim & He (2010) wurde an Gründächern in Hong Kong eine komplette Wärmebilanz erstellt, in dem die Flüsse der sensitiven und latenten Wärme mittels verschiedener mikroklimatischer Größen und der Bodentemperaturen und –feuchten erfasst wurden. Die meiste Wärme wurde von Sträuchern und einer Grasfläche als latente und fühlbare Wärme abgeführt, wobei

die unter tropisch-feuchten Bedingungen ermittelten Ergebnisse (z.B. auch die Untersuchung von Parizotto & Lamberts 2011 in Süd-Brasilien) nur bedingt auf gemäßigte Regionen übertragbar sind und die Untersuchungen eher auf intensive Systeme abzielten. In einem kanadischen Projekt reduzierte eine auf einem Dach etablierte Grasfläche die mittleren täglichen Temperaturfluktuationen im Sommer von 45°C an der Oberfläche einer unbewachsenen Referenzfläche auf nur 6°C über dem Pflanzenbestand (Liu & Baskaran 2003). Auch in einer japanischen Studie wurde die Evaporationskühlung einer auf einem Dach angelegten Grasfläche bestätigt (Onamura et al. 2001).

Gemäß Takakura et al. (2000) ist die Kühlleistung von Dachbegrünungen zu 30% durch die Transpirationskühlung der Vegetation bedingt. Demnach konnten Wolf & Lundholm (2008) auch die positive Korrelation zwischen Biomasse und Transpirationskühlung bestätigen. Lundholm et al. (2010) und MacIvor und Lundholm (2011) zeigten in weiteren Versuchen, dass Artenvielfalt, insbesondere bei Mischungen mit Gräsern, zu höheren Transpirations- und damit Kühlraten führt, als eine Bepflanzung mit Monokulturen.

In einer groß angelegten Untersuchung der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (BLWG 2002) wurde der Klimatisierungseffekt verschiedener Gräser-Kräuter-Mischungen und Stauden bei Intensivbegrünungen untersucht, jedoch gibt es bislang keine veröffentlichten Untersuchungen zu den in Deutschland üblicherweise verwendeten extensiven Sedum-Gras-Mischungen. In exemplarischen Untersuchungen konnte allerdings von Butler & Orians (2011) gezeigt werden, dass *Sedum* Arten die Bodentemperaturen um 5-7°C reduzieren können und krautigen Arten zu einem verbesserten Wachstum verhelfen können. Die Autoren bezeichnen die Sedum-Pflanzen aufgrund ihrer positiven Wirkung vor allem unter extrem trocken-heißen Bedingungen als „*nursery plants*“. Es kann daher sinnvoll sein, geeignete Pflanzenmischungen mit hohen Anteilen von Sedum-Arten zu entwickeln, in denen sich viele verschiedene Pflanzenarten etablieren können bzw. in denen die Überlebenswahrscheinlichkeit vieler Arten über möglichst lange Zeiträume erhalten werden kann. Dies würde dem Ziel der Erhöhung der Biodiversität entsprechen, womit aber nicht unbedingt eine Erhöhung der Transpirationskühlung einhergeht.

In einer australischen Studie von Coutts et al. (2013) wurde ein mit einer Sedumart (*S. rubrotinctum*) bepflanzt Dach mit einem mit Substrat ausgestatteten und einem mit weißer Farbe gestrichenen „cool roof“ verglichen. Das weiße Dach führte aufgrund seiner hohen Albedo zur stärksten Reduzierung der Nettostrahlung an der Dachoberfläche, so dass auf diesem am wenigsten Energie zur Bildung fühlbarer Wärme zur Verfügung stand. Da das mit Sedum bewachsene Dach unter trocken-heißen Bedingungen nicht mehr transpirierte, bildete sich tagsüber ein starker Wärmefluss fühlbarer Wärme aus, so dass die Aufheizung des Systems bzw. die Erwärmung der Umgebung wesentlich höher als die des weißen Dachs war. Ähnliche Beobachtungen wurden in den Studien von Takebayashi & Moriyama (2007), Chen et al. (2009) und Scherba et al. (2011) gemacht. Santamouris (2012) weist aber in seinem Übersichtsartikel darauf hin, dass bei Studien zur Untersuchung des Wärmehaushalts von unbegrüntem und begrüntem Dächern die Auswahl repräsentativer Vergleichsobjekte oft problematisch ist und dass die beobachteten Kühleffekte sowohl klima-, jahreszeitlich- als auch tagesgangabhängig sind. Des Weiteren reduziert sich die Albedo von unbewachsenen Flächen in Abhängigkeit der Witterung und Luftqualität (Staub, UV-Strahlung, Mikrobiota) mit der Zeit durch Verschmutzung (Berdahl et al. 2002, Miller et al. 2002; Cheng et al. 2012), so dass sich der vermeintliche Vorteil gegenüber begrüntem Dächern über die Zeit verringert.

Neueste Untersuchungen (Coutts et al. 2013, Blanusa et al. 2013) deuten sogar darauf hin, dass sukkulente CAM-Arten (z.B. *Sedum*) aufgrund ihres Bestrebens, die Transpiration tagsüber zu verringern, keine geeigneten Arten für die Abfuhr der auf das Dach eingehenden Strahlungsenergie (latente Wärme bzw. Transpira-

tionskühlung) sind. Die Nutzung stärker transpirierender Arten sowie die Kombination verschiedener Arten und eine zusätzliche Wasserzufuhr in Trockenzeiten können ggf. deutlichere und länger anhaltende Kühleffekte bewirken.

Tröltzsch et al. (2012) stellen in der vom Umweltbundesamt geförderten Studie abschließend fest, dass die positive Wirkung von Gründächern auf das Mikro- und Mesoklima von vielen dort nicht näher genannten Faktoren abhängt und vor allem bei längerer Trockenheit vermutlich „gegen Null“ geht. Auch in der Studie der Stadt Hamburg (FFH 2012) wird davon ausgegangen, dass die Umgebungsluft bei ausgetrockneter Vegetation schnell wieder auf das Normalniveau ansteigen kann. Nur über längerfristige, vergleichende Messungen der Lufttemperaturen und –feuchtigkeiten an verschiedenen repräsentativen Dachbegrünungssystemen und unbegrünten Referenzobjekten können belastbare Informationen zur tatsächlichen Kühlwirkung der Dachvegetation ermittelt werden. Ein derartiges F+E Projekt wurde jüngst mit Mitteln des EU Life+ Programms initiiert (Green Clime Adapt – Green Roof for Home buildings, s. Augustenborg Botanical Roof Garden). Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts lagen aber keine veröffentlichten Ergebnisse vor.

2.6 ZIELSETZUNG DES PROJEKTS

Bei der Frage zur Kühlwirkung einzelner Pflanzenarten bzw. Pflanzenmischungen geht es vor allem um die Identität einzelner Pflanzenarten, deren spektrale, anatomische und physiologische Eigenschaften sowie um deren Ökologie. Dabei sind das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis (Sukkulenz), die Pflanzenhöhe und Geometrie (Schattenbildung), das Wurzelsystem bzw. Sproß:Wurzel-Verhältnisse, das Vorhandensein von (weißen) Haarfilzüberzügen, Glashaaren, Drüsen und Wachsüberzügen und der Photosynthesetyp (C3, C4 oder CAM) wichtige ökologische Anpassungen der thermo- und xerophilen Pflanzenarten an den Extremstandort Dach. Diese Anpassungen können sich positiv auf den Wasserhaushalt der Pflanzen und die Rückstrahlung und Verdunstung auswirken und damit die Temperatur der Umgebungsluft reduzieren.

Während es bei den niedrigwüchsigen Pflanzenarten der Dachvegetation nur wenige systematische Untersuchungen zu deren thermischen Verhalten (z.B. Blanusa et al. 2013) gibt, sind artspezifische Unterschiede der Aufheizung bei Stadtbäumen gut belegt. So zeigten Leuzinger et al. (2010) in Basel und Meier & Scherer (2012) in Berlin anhand thermographischer Messungen mit Infrarotkameras deutliche Unterschiede der Kronentemperaturen verschiedener Baumarten und der Tagesamplituden. Insgesamt scheinen sich kleinblättrige Arten weniger stark gegenüber der Außentemperatur aufzuheizen als großblättrige wie der Ahorn (*Acer platanoides*). Geschlitzt blättrige Arten (z.B. Kastanien und Eichen) und Koniferen wie die Kiefer (*Pinus spec.*) heizten sich dagegen nur wenig auf, was an der Verringerung der atmosphärischen Grenzschichtwiderstände liegt und eine stärkere Wärmeabfuhr ermöglicht. Solche Prozesse werden vermutlich auch das thermische Verhalten der niedrigwüchsigen Vegetation beeinflussen, so dass die Auswahl bestimmter Arten und Artenkombinationen günstig erscheinen kann.

Ziel muss es daher sein, eine robuste geschlossene Xerothermvegetation zu etablieren, die flexibel auf Extreme reagiert, Trockenstress überlebt und schnell auch auf geringe Niederschlagsmengen reagiert. Es sind hier auch niedere Pflanzen (Moose und Flechten) zu nennen, die als poikilohydre (wechselfeuchte) Pflanzen besonders gut an Trockenstandorte angepasst sind. Es ist ggf. anzustreben, die Auswahl der zur Dachbegrünung eingesetzten Pflanzenarten bzw. –sorten nicht vorrangig auf den Aspekt der Attraktivität (z.B. Blüh-

freude und Blütenfarbe) zu basieren, sondern auch die Kriterien der Reflektivität und Diversität des Bestandes miteinzubeziehen.

Ferner kann es sinnvoll sein, weniger blühfreudige bzw. spät blühende Sorten zu bevorzugen, da diese vermutlich über längere Zeiträume in der vegetativen Phase verbleiben und die Ressourcen nicht in die Samenproduktion verschwenden. Eine Auswahl geeigneter heimischer Pflanzenarten, die bei den zukünftig höheren Temperaturen keine Wachstumseinschränkungen erleiden sollten, kann anhand der ökologischen Zeigerwerte für Licht, Temperatur, Wasser und Kontinentalität von Ellenberg et al. (2001) erfolgen. Für mediterrane Räume haben Caneva et al. (2013) eine Auswahl geeigneter Arten anhand biologisch-ökologischer Merkmale zusammengestellt.

In den bisher durchgeführten experimentellen Studien zu diesem Thema wurden meist jedoch nur Modellsysteme verwendet, die nicht repräsentativ für in der Praxis genutzte Gründächer sind. Zudem sind die Untersuchungszeiträume oft zu kurz, und es werden nur einzelne Tagesverläufe z.B. der Strahlungsbilanz betrachtet. Aus Platzgründen werden oftmals auch keine Wiederholungen benutzt. Auch die Standorte der Untersuchungen sind oft nicht optimal ausgewählt. Beispielweise waren bei Coutts et al. (2013) die Versuchsobjekte im Tagesverlauf oft beschattet oder die zu untersuchenden Objekte oft nicht frei anströmbar, so dass der Wärmeaustausch nicht gewährleistet war. Auch wurde nur eine botanisch nicht gut charakterisierte Pflanzenart betrachtet (oft wird von „short grass“ oder „sedum“ gesprochen) und die Entwicklung der Vegetationsdeckung über die Zeit wurde nicht erfasst. Auch in der Londoner Untersuchung von Connop et al. (2013) wurde nicht auf die Artzusammensetzung der genutzten „biodiversen Mischung“ eingegangen. Zudem wurden nur die Daten der heißesten Tage präsentiert, an denen die Mischungen besser als die Standard-Sedum-Ausführung geeignet waren, die Lufttemperatur durch Transpirationskühlung zu reduzieren.

Aufgrund der genannten Probleme sollte ein Schwerpunkt der Forschung auf geeignete Zusammenstellungen und die Optimierung der zur Begrünung benutzten Pflanzenmischungen gelegt werden sowie auf praxisnahe Langzeituntersuchungen ausgerichtet sein. Dabei sollte die unterschiedliche Wassernutzungseffizienz bzw. Anpassung einzelner Pflanzenarten bzw. funktioneller Gruppen an Extremtemperaturen und extremen Wassermangel berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Vorhabens sollten unter anderen folgenden Hypothesen überprüft werden:

- Mischungen sind besser als Monokulturen zur Wasserretention und Klimaregulierung geeignet. Sie haben eine höhere Trockenadaptation und Langlebigkeit (Resilienz), da sie die knappen Ressourcen besser nutzen und das System insgesamt stabilisieren.
- Eine geeignete Kombination von funktionellen Typen in Mischungen wirkt sich positiv auf die Wasserretention und Klimaregulierung aus. Leguminosen (N-Fixierer) tragen positiv zur Nährstoffökologie bei. Sehr trockenadaptierte Sukkulente können über längere Zeiträume Wasser speichern. Lange aufrechte Blätter von Gräsern und die horstartige Wuchsform verringern den Grenzschichtwiderstand zwischen Atmosphäre und Vegetation und erhöhen die Abfuhr von Wärme.

3 Material und Methoden

Im Rahmen des Projekts sollte die Klimawirksamkeit verschiedener, in der Extensivdachbegrünung vorrangig genutzter Pflanzenarten eingehend untersucht werden. Tabelle A1 im Anhang zeigt eine Liste von Pflanzenarten bzw. Kulturformen, die von der Landeshauptstadt Stuttgart bzw. deren Garten- und Friedhofsamt (2003) und der Stadt Heidelberg (2011) zur Extensivbegrünung von Dächern empfohlen werden. Als weitere Angaben sind die bevorzugte Substrathöhe, die maximale Pflanzenhöhe und Wuchsform aufgelistet.

Das Projekt gliederte sich auf in zwei Versuche. In einem Freilandversuch (Arbeitspaket 1, September 2013 bis September 2014) ging es um Experimente zur Kühlwirkung einzelner Pflanzenarten und –mischungen. In einem die Freilanduntersuchungen begleitenden Gewächshausversuch (Arbeitspaket 2, November 2013 – März 2014) wurden an 50 ausgewählten Pflanzenarten Untersuchungen zum Wachstum, zur Blattanatomie und den optischen Eigenschaften der Blätter durchgeführt. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der im Arbeitspaket 1 und 2 verwendeten Pflanzenarten und deren Familienzugehörigkeit.

3.1 EXPERIMENTE ZUR KÜHLWIRKUNG VON PFLANZENBESTÄNDEN

Da *in situ* Messungen des Bestandsklimas von auf verschiedenen Dächern etablierten Pflanzenmischungen keinen Direktvergleich der Reaktion einzelner Pflanzenarten bzw. –gruppen (Kräuter, Gräser, Leguminosen und Sukkulente) und definierter Mischungen auf Trockenheit und das artspezifische thermische Verhalten ermöglichen, sollten in diesem Experiment Monokulturen und Mischungen verschiedener Pflanzenarten in einem grundlegenden Exaktversuch mit in Pflanzschalen (Mesokosmen) etablierten Kleinbeständen betrachtet werden.

Dazu wurde von einem am Markt etablierten Gründach-Systemhersteller Material eines typischen mehrschichtigen Systemaufbaus für Extensivbegrünungen (Drän-, Filter-, Substrat- und Vegetationsschicht, vgl. Abb. 2) entsprechend den Dachbegrünungsrichtlinien der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL, 2008) besorgt. Die passgenau zugeschnittenen Schichten des Systemaufbaus wurden in wetterbeständige, grüne Polyolefinschalen (Innenmaße Oberkante: 65*40*18, L*B*H) gelegt und ergaben inklusive des darauf ausgebrachten Pflanzsubstrats eine Gesamthöhe von 15 cm. Da der Durchfluss bzw. die Niederschlagsretention (Abflussbeiwert) der Kleinbestände erfasst werden sollte, wurden die Pflanzschalen in der Mitte mit einer 1 cm breiten Bohrung versehen.

Unter die einfach gelochte Schale wurde ein 20 L fassender Stapelbehälter (Wassersammelschale) gestellt, über dessen regelmäßige Leerung der Durchfluss bzw. die Wasserretention eines jeden Kleinbestands bzw. Systems bestimmt werden konnte. Die im unteren Stapelbehälter maximal auffangbare Wassermenge entspricht bezogen auf die Fläche des darüber stehenden Gefäßes einer Niederschlagsmenge von 77 L pro Quadratmeter. Es war davon auszugehen, dass sich im Verlauf des Versuchs bei den eingesetzten verschiedenen Arten und Mischungen über das unterschiedliche Wachstum und die unterschiedliche phänologische Entwicklung modulierte Unterschiede der Wassernutzung und der Niederschlagsretention ergeben.

Tabelle 1: Liste der in den Arbeitspaketen 1 (**fett gedruckt**) und 2 verwendeten Pflanzenarten

Art (wissenschaftlicher Name)	Deutscher Name bzw. Sortenname	Familie
<i>Achillea millefolia</i>	Wiesenschafgarbe	Asteraceae
<i>Allium schoenoprasum</i>	Schnittlauch	Liliaceae
<i>Anthemis tinctoria</i>	Färberkamille	Asteraceae
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Gewöhnliches Ruchgras	Poaceae
<i>Aquilegia vulgaris</i>	Gemeine Akelei	Ranunculaceae
<i>Aster linosyris</i>	Goldhaaraster	Asteraceae
<i>Campanula glomerata</i>	Knäuelglockenblume	Campanulaceae
<i>Campanula persicifolia</i>	Pfirsichglockenblume	Campanulaceae
<i>Campanula rapunculoides</i>	Acker Glockenblume	Campanulaceae
<i>Campanula rotundifolia</i>	Rundblättrige Glockenblume	Campanulaceae
<i>Centaurea scabiosa</i>	Scabiosen Flockenblume	Asteraceae
<i>Clinopodium vulgare</i>	Wirbeldost	Lamiaceae
<i>Crysanthemum leucanthemum</i>	Wiesenmargerite	Asteraceae
<i>Dianthus carthusianorum</i>	Karthäusernelke	Caryophyllaceae
<i>Dianthus deltoides</i>	Heide-Nelke	Caryophyllaceae
<i>Euphorbia cyparissias</i>	Zypressenwolfsmilch	Euphorbiaceae
<i>Festuca ovina</i>	Schafschwingel	Poaceae
<i>Festuca rubra</i>	Rotschwingel	Poaceae
<i>Fragaria vesca</i>	Walderdbeere	Rosaceae
<i>Galium verum</i>	Echtes Labkraut	Rubiaceae
<i>Hieracium murorum</i>	Waldhabichtskraut	Asteraceae
<i>Hieracium pilosella</i>	Kleines Habichtskraut	Asteraceae
<i>Hypericum perforatum</i>	Echtes Johanniskraut	Hypericaceae
<i>Knautia arvensis</i>	Acker Witwenblume	Dipsacaceae
<i>Koeleria glauca</i>	Blaues Schillergras	Poaceae
<i>Linum perenne</i>	Staudenlein	Linaceae
<i>Lotus corniculatus</i>	Hornklee	Fabaceae
<i>Medicago lupulina</i>	Hopfenklee	Fabaceae
<i>Onobrychis viciifolia</i>	Espарsette	Fabaceae
<i>Origanum vulgare</i>	Oregano	Lamiaceae
<i>Papaver dubium</i>	Saatmohn	Papaveraceae
<i>Papaver rhoeas</i>	Klatschmohn	Papaveraceae
<i>Petrorhagia saxifraga</i>	Felsennelke	Caryophyllaceae
<i>Plantago media</i>	Mittlerer Wegerich	Plantaginaceae
<i>Poa pratensis</i>	Wiesenrispengras	Poaceae
<i>Potentilla recta</i>	Hohes Fingerkraut	Rosaceae
<i>Prunella grandiflora</i>	Große Braunelle	Lamiaceae
<i>Prunella vulgaris</i>	Gemeine Braunelle	Lamiaceae
<i>Rumex acetosella</i>	Kleiner Sauerampfer	Polygonaceae
<i>Salvia pratensis</i>	Wiesensalbei	Lamiaceae
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf	Rosaceae
<i>Saponaria ocymoides</i>	Polsterseifenkraut	Caryophyllaceae
<i>Sedum acre</i>	Scharfer Mauerpfeffer	Crassulaceae
<i>Sedum album</i>	Weißer Fetthenne	Crassulaceae
<i>Sedum kamtschaticum</i> var. <i>floriferum</i> =	Weihenstephaner Gold	Crassulaceae
<i>Phedimus floriferus</i>		
<i>Sedum sexangulare</i>	Milder Mauerpfeffer	Crassulaceae
<i>Sedum telephium</i>	Purpur Fetthenne	Crassulaceae
<i>Silene vulgaris</i>	Aufgeblasenes Leimkraut	Caryophyllaceae
<i>Teucrium scorodonia</i>	Salbei Gamander	Lamiaceae
<i>Thymus pulegioides</i>	Feld Thymian	Lamiaceae
<i>Thymus serpyllum</i>	Sand-Thymian	Lamiaceae

Als unterste Schicht der Pflanzschale wurde eine Schutzmatte aus 0.5 cm dickem Vlies (33*60 cm) benutzt, auf der ein aus Erhebungen und Mulden bestehendes 2.5 cm hohes ZinCo PE-Drainageelement (Floradrain® FD25, 34 * 60.5 cm) aufgebracht wurde. Das Füllvolumen der Wasserspeichermulden beträgt 10 L pro m², was einem Wasserspeichervermögen von 2.6 L in der Pflanzschale gleichkommt (Systemfläche 0.26 m²). Beim Einlegen des Drainageelements wurde darauf geachtet, dass die Entwässerungslöcher oben lagen, um in allen Systemen dieselben Drain- bzw. Wasserspeichereigenschaften zu erhalten.

Über dem Drainageelement folgte ein ZinCo Systemfilter SF (45 * 71 cm), der an den Innenkanten der Pflanzschalen umlaufend hochgezogen wurde, damit bei der Befüllung der Schalen mit Substrat keine Bestandteile in die unteren Schichten gelangten. Schließlich folgte als oberste Schicht eine Systemerde „Steinrosenflur“. Um ein einheitliches Bodenvolumen bereitzustellen, wurde jede Pflanzschale mit exakt 26 L Substrat gefüllt, was einem Gewicht von 31 kg entsprach (Leergewicht der Schale plus Schichtmaterial 1.9 kg) und eine Dicke der Substratschicht von 10 cm ergab. Dabei wurde das Bodenmaterial im Wechsel aus zwei *big bags* entnommen, um mögliche Substratunterschiede (z.B. bezüglich des Wassergehalts und der Zusammensetzung) auszugleichen. Das Substrat besteht aus einer definierten Mischung aus Ziegelsplitt, Tonschiefer, Torf und Grünschnitt. Insgesamt wurden 4 m³ Substrat beschafft, wobei im Arbeitspaket 1 nur 3.3 m³ benötigt wurden. Abbildung 2 verdeutlicht den Schichtaufbau des Systems.

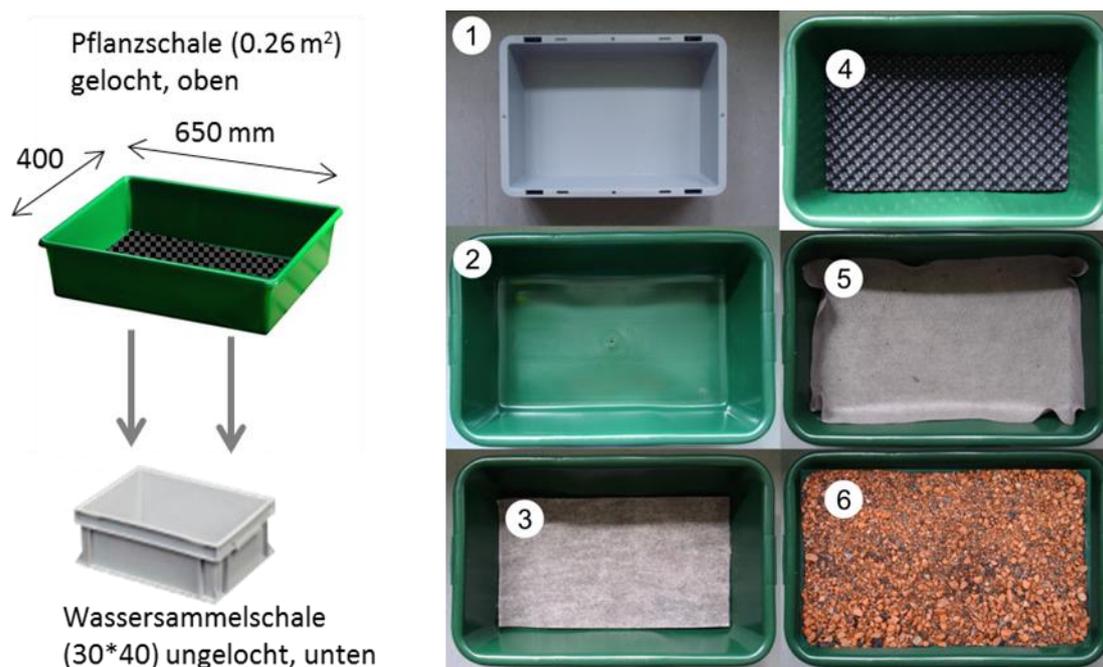


Abbildung 2: Aufbau der in den Versuchen genutzten Pflanzschalen bzw. -systeme. Links: Seitenansicht. Rechts: Schichtung des Systems (Draufsicht): 1: Wassersammelschale unten, 2: zentral gelochte Pflanzschale, 3: Schutzvlies (unterste Schicht), 4: Floradrain® FD25Drainelement, 5: Systemfilter SF (an den Seiten hochgeschlagen), 6: Systemerde „Steinrosenflur“ (oberste Schicht).

Insgesamt wurden 128 Schalen mit dem beschriebenen Systemaufbau ausgestattet. Diese Zahl ergab sich aus den verschiedenen Pflanzansätzen, die jeweils in acht Wiederholungen pro Ansatz bereitgestellt wurden (s. unten). Zwei ohne Schichten ausgestattete Schalen dienten zur Ermittlung der auf der Fläche der Schalen (0.26 m²) gefallenen Niederschlagsmenge. Die regelmäßige Bestimmung der Niederschlagsmenge und des in den Wassersammelschalen vorhandenen Volumens diente zur Bestimmung der im System verbliebenen Wassermenge bzw. des Abflussbeiwerts (s.o.).

Die Auswahl der in den Pflanzschalen etablierten Arten bzw. Mischungen berücksichtigte die von der Stadt Heidelberg (2011) und der Stadt Stuttgart (2003) zur Begrünung vorgeschlagenen Pflanzenarten regionaler Herkunft für Extensivbegrünungen. Der Schwerpunkt wurde auf thermophile, langlebige Arten gelegt, da diese die durch die „Klimaleitplanken“ Baden-Württembergs (LUBW 2013) für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) vorhergesagte Temperaturerhöhung zwischen 0.8 und 1.7°C (Median von 1.1°C) vermutlich gut überstehen können. Außerdem wurden verschiedene funktionelle Typen benutzt, um den Einfluss verschiedener Lebens- und Wuchsformen auf das thermische Verhalten der Pflanzenbestände und deren Wasserretention zu überprüfen. Tabelle 2 enthält eine Übersicht der wichtigsten ökologischen Informationen der verwendeten Arten aus den Datenbanken des Bundesamts für Naturschutz (BfN) z.B. FLORAWEB und BIOLFLORE, sowie die Zeigerwerte nach Ellenberg et al. (2001).

Da in der Extensivdachbegrünung als Leitart im Normalfall eine sukkulente Art meistens der Gattung *Sedum* etabliert wird, wurde in der Untersuchung die Art *Phedimus floriferus* „Weihenstephaner Gold“ oder Goldfetthenne (synonym zu *Sedum kamtschaticum* var. *floriferum*) benutzt. Diese wurde in den Monokulturen und in jeder der aus zwei oder drei Arten aufgebauten Mischkultur verwendet. Daneben wurden die beiden krautigen Arten *Dianthus carthusianorum* L. (Karthäusernelke) und *Thymus serpyllum* L. (Sandthymian) verwendet. Als repräsentative Grasart wurde *Koeleria glauca* L. (Blaues Schillergras) und als repräsentative Leguminose *Lotus corniculatus* L. (Hornklee) ausgewählt (vgl. Tabelle 1). Bis auf letztere Art wurde das Pflanzenmaterial als Flachballenpflanzen über den Handel besorgt. Dies hatte den Vorteil, dass das Pflanzmaterial bereits gut entwickelt war und zeitaufwändige Vorkulturen entfallen konnten. Da Leguminosen im Handel aber nicht als vorkultiviertes Material zu beziehen sind, wurden Samen von *L. corniculatus* Anfang August 2013 zum Keimen gebracht und zwei Wochen später in Multitopfplatten umpikiert, so dass zum Versuchsbeginn am 23. September 2013 genügend Material zur Verfügung stand. Die Pflanzen, vor allem ihre Wurzelballen, waren aber etwas kleiner als die über den Handel bezogenen Flachballenpflanzen. Während des Versuches kam es zum Absterben einzelner *Lotus*-Pflanzen. Diese wurden durch verbliebene Pflanzen aus der Vorkultur ersetzt, jedoch gab es weitere Ausfälle.

Von jeder der fünf ausgewählten Pflanzenarten wurden Ansätze mit Monokulturen (Typ 1) angelegt und mit den aus zwei (Typ 2) bzw. drei Arten (Typ 3) zusammengesetzten Mischkulturen verglichen. Eine Übersicht der insgesamt 15 Ansätze ist in Tabelle 3 gegeben. Von jedem der 15 Ansätze wurden acht Wiederholungen bereitgestellt. Jede Schale bzw. jeder Typ wurde mit 12 Pflanzen bepflanzt, so daß sich in allen Schalen eine Bestandsdichte von 46,15 Pflanzen pro m² ergab. Eine Übersicht zum Pflanzschema findet sich in Abbildung 3. Neben den bepflanzten Schalen wurden unbepflanzte Kontrollschalen benutzt sowie je eine Schale mit dunklem Lava-Bims-Substrat (Vulkaplus extensiv 0/12, VulkaTec) und eine Schale mit hellem Quarzkies der Körnung 16-32 mm verwendet, die als Vergleichs- und Referenzschalen für die Temperaturmessungen dienten.

Tabelle 2: Übersicht der wichtigsten ökologischen Informationen der verwendeten Arten sowie Angabe der Zeigerwerte nach Ellenberg et al. (2001). *Daten von *Phedimus spurius*.

		<i>Dianthus carthusianorum</i> L.	<i>Lotus corniculatus</i> L.	<i>Koeleria glauca</i> (Spreng.) DC.	<i>Thymus serpyllum</i> L.	<i>Phedimus floriferus</i>
	Familie	Caryophyllaceae	Fabaceae	Poaceae	Lamiaceae	Crassulaceae
Zivilisations-einfluss	Hemerobie	oligo- bis mesohemerob	oligo- bis beta-euhemerob	oligo- bis mesohemerob	oligo- bis mesohemerob	meso- bis polyhemerob*
	Urbanität	mäßig urbanophob	urbanoneutral	urbanophob	mäßig urbanophob	mäßig urbanophil*
Wasser- u. Gashaushalt	Photosynthesetyp	C3	C3	C3	C3	fakultativ CAM
	Blattform	grasartig	gefiedert	grasartig	normal	schuppenförmig
	Blattanatomie	skleromorph	mesomorph	mesomorph, skleromorph	skleromorph	blattsukkulent
	Blattausdauer	überwinternd grün	sommergrün	sommergrün	immergrün	überwinternd grün*
Zeigerwerte nach Ellenberg	Lichtzahl	L8 Lichtpflanze	L7 Halblichtpflanze	L7 Halblichtpflanze	L7 Halblichtpflanze	L8 Lichtpflanze*
	Temperaturzahl	T5 Mäßigwärmezeiger	Tx indifferentes Verhalten	Tx indifferentes Verhalten	T6 Mäßigwärme- bis Wärmezeiger	T6 Mäßigwärme- bis Wärmezeiger*
	Kontinentalitätszahl	K4 subozeanisch	K3 ozeanisch bis subozeanisch	K3 ozeanisch bis subozeanisch	K5 subozeanisch bis subkontinental	K4 gemäßigtes Seeklima zeigend*
	Feuchtezahl	F3 Trockniszeiger	F4 Trocknis- bis Frischezeiger	F4 Trocknis- bis Frischezeiger	F2 Trocknis- bis Starktrockniszeiger	F3 Trockniszeiger*
	Reaktionszahl	R7 Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger	R7 Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger	R7 Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger	R5 Mäßigsäurezeiger	R5 Mäßigsäurezeiger*
	Stickstoffzahl	N2 stickstoffarme bis -ärmste Standorte anzeigend	N3 auf stickstoffarmen Standorten häufiger	N3 auf stickstoffarmen Standorten häufiger	N1 stickstoffärmste Standorte anzeigend	N3 auf stickstoffarmen Standorten häufiger
	Salzzahl	S0 nicht salzertragend	S0 nicht salzertragend	S0 nicht salzertragend	S0 nicht salzertragend	S0 nicht salzertragend*
	Lebensform	krautiger Chamaephyt	Hemikryptophyt	Hemikryptophyt	holziger Chamaephyt	krautiger Chamaephyt*
	Gesellschaft	Brometalia erecti	Anthropozoogene Heiden und Wiesen	Anthropozoogene Heiden und Wiesen	Corynephoralia	-

Nach dem Bepflanzen erhielt jede Schale, auch die unbepflanzten Kontrollen, eine Wassergabe von 2 L, um ein Angehen der Pflanzen sicherzustellen. Eine einmalige Düngergabe von 6,5g ZinCo Pflanzenfit® 4 M erfolgte am 2. Mai.2014. Der Dünger enthält 23% Gesamtstickstoff, dies bedeutet eine Gabe von 1.495 g Stickstoff pro Schale. Bezogen auf einen Hektar entspricht dies einer Menge von 57.5 kg. Solch eine Initialdüngung zur Unterstützung der Systemetablierung bei der Neuanlage eines Gründaches ist auch bei extensiven Anlagen in der Praxis gängig.

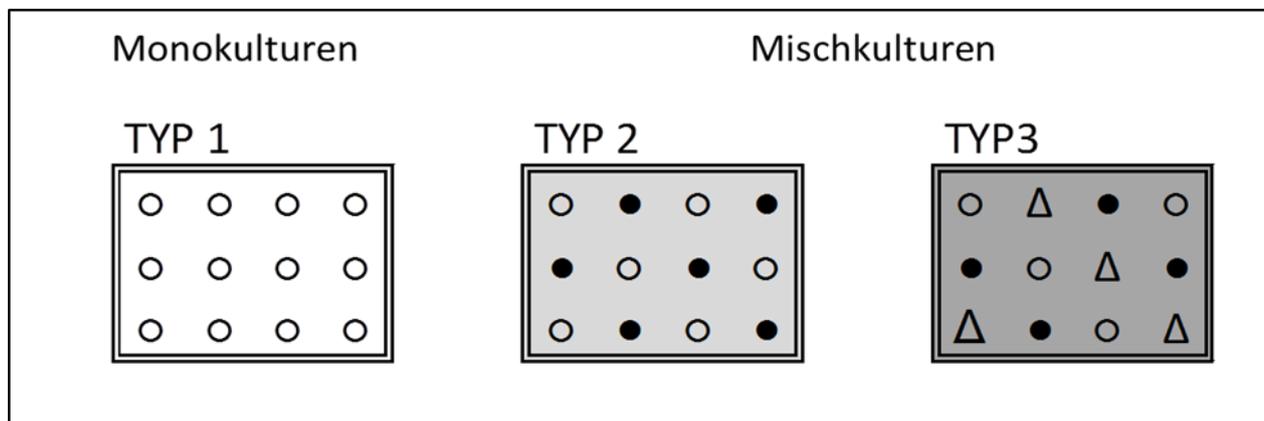


Abbildung 3: Pflanzschema der Monokulturen (Typ 1) und der aus zwei (Typ 2) bzw. drei Arten (Typ 3) zusammengesetzten Mischkulturen. In den Mischkulturen wurden dieselben Mischungsverhältnisse (beim Typ 2 eine 1:1 und beim Typ 3 eine 1:3 Mischung) genutzt, wobei jeweils *Phedimus floriferus* (○) als Leitart verwendet wurde.

Als weiteres Versuchselement sollte die eine Hälfte jedes Ansatzes (vier Wiederholungen) im Sommer 2014 nur den während des Versuchs fallenden Niederschlag (Normalvariante) erhalten, während die anderen vier Wiederholungen eine Zusatzbewässerung von 30% erhalten sollten. Über den Vergleich der unterschiedlich bewässerten Varianten sollte eine Beurteilung erfolgen, welche der Arten bzw. Artmischungen unter den gegebenen Bedingungen besser wächst, mehr Niederschläge zurückhält und somit mehr zur Kühlung beitragen kann. Diese zusätzliche Bewässerungsvariante konnte jedoch nicht realisiert werden, da sich ab Mitte Juli eine kühl-nasse Witterung einstellte und die Pflanzen deutlich mehr Wasser zur Verfügung hatten als im Langzeitmittel (s. Kapitel 4.1.1). Es konnten aber dennoch anhand der wöchentlichen Erfassung des Durchflusses nach Starkregenereignissen viele wertvolle Erkenntnisse zur Wasserretention unterschiedlicher Pflanzsysteme gewonnen werden.

Die Versuche erfolgten unter Freilandbedingungen, da Ergebnisse aus kontrollierten Experimenten (z.B. in Klimakammern und im Gewächshaus) nicht ohne weiteres auf die Austauschigenschaften der Atmosphäre im Freiland übertragen werden können. Für die Versuche wurde eine große Fläche von ca. 150 m² benötigt, da zur Erreichbarkeit der Schalen und der guten Handhabbarkeit der Untersuchungen an den einzelnen Systemen Wege eingeplant werden mussten. Die Schalen wurden zur Etablierung der Bestände am 23. September 2013 zunächst auf einer mit Drahtgittern gesicherten Fläche auf dem Campus Hohenheim in fünf Reihen (26 pro Reihe) aufgestellt, wobei sich in der Mitte ein Durchgang befand. Nachdem alle Pflanzen gut angegangen waren, wurden die Schalen am 20. November 2013 mit einem Tieflader auf eine Freifläche der Station für Agrarwissenschaften (Standort Heidfeldhof) transportiert. An dieser im freien Feld gelegenen Stelle war im Gegensatz zur zunächst ausgewählten stark umbauten Fläche eine gleichmäßige Verteilung der Niederschläge sichergestellt. Eine Übersicht zur Lage der anfangs und der ab dem dritten Monat des Versuchs benutzten Untersuchungsflächen sowie ein Aufstellplan sind in Abbildung 4 enthalten. Um die Etablierung

anderer Pflanzenarten in den Systemen zu verhindern, wurden regelmäßig Unkrautkontrollen durch manuelles Jäten durchgeführt.

Tabelle 3: Übersicht zu den benutzten Monokulturen und Mischungen nach Pflanzenarten und nach Kombinationen von funktionellen Gruppen.

Komb. Nr.	TYP	Hauptart	Begleitart 1	Begleitart 2	Artkombinationen	Kombination funktioneller Gruppen	Schalen Nr.
5 Monokulturen							
1	1	1	0	0	<i>Koeleria glauca</i>	Gras	1-8
2	1	2	0	0	<i>Lotus corniculatus</i>	Leguminose	9-16
3	1	3	0	0	<i>Dianthus carthusianorum</i>	Kraut	17-24
4	1	4	0	0	<i>Thymus serpyllum</i>	Zwergstrauch	25-32
5	1	5	0	0	<i>Phedimus floriferus</i>	Sukkulente	33-40
4 Mischungen, 2 Arten, alle mit <i>Phedimus</i> als Art 1 (Leitart mit 50%)							
6	2	5	1	0	<i>Phedimus floriferus</i> + <i>Koeleria glauca</i>	Sukkulente mit Gras	41-48
7	2	5	2	0	<i>Phedimus floriferus</i> + <i>Lotus corniculatus</i>	Sukkulente mit Leguminose	49-56
8	2	5	3	0	<i>Phedimus floriferus</i> + <i>Dianthus carthusianorum</i>	Sukkulente mit Kraut	57-64
9	2	5	4	0	<i>Phedimus floriferus</i> + <i>Thymus serpyllum</i>	Sukkulente mit Zwergstrauch	65-72
6 Mischungen, 3 Arten, alle mit <i>Phedimus</i> als Art 1 (Leitart mit 33%)							
10	3	5	1	3	<i>Phedimus floriferus</i> + <i>Koeleria glauca</i> + <i>Dianthus carthusianorum</i>	Sukkulente mit Gras und Kraut	73-80
11	3	5	1	4	<i>Phedimus floriferus</i> + <i>Koeleria glauca</i> + <i>Thymus serpyllum</i>	Sukkulente mit Gras und Zwergstrauch	81-88
12	3	5	2	3	<i>Phedimus floriferus</i> + <i>Lotus corniculatus</i> + <i>Dianthus carthusianorum</i>	Sukkulente mit Leguminose und Kraut	89-96
13	3	5	2	4	<i>Phedimus floriferus</i> + <i>Lotus corniculatus</i> + <i>Thymus serpyllum</i>	Sukkulente, Leguminose und Zwergstrauch	97-104
14	3	5	1	2	<i>Phedimus floriferus</i> + <i>Koeleria glauca</i> + <i>Lotus corniculatus</i>	Sukkulente mit Gras und Leguminose	105-112
15	3	5	3	4	<i>Phedimus floriferus</i> + <i>Dianthus carthusianorum</i> + <i>Thymus serpyllum</i>	Sukkulente, Kraut und Zwergstrauch	113-120
0						Kontrollen ohne Pflanzen	121-128
-						Kontrollschalen	129-130
-						Referenz Quarzkies	131
-						Referenz Lava-Bims	132

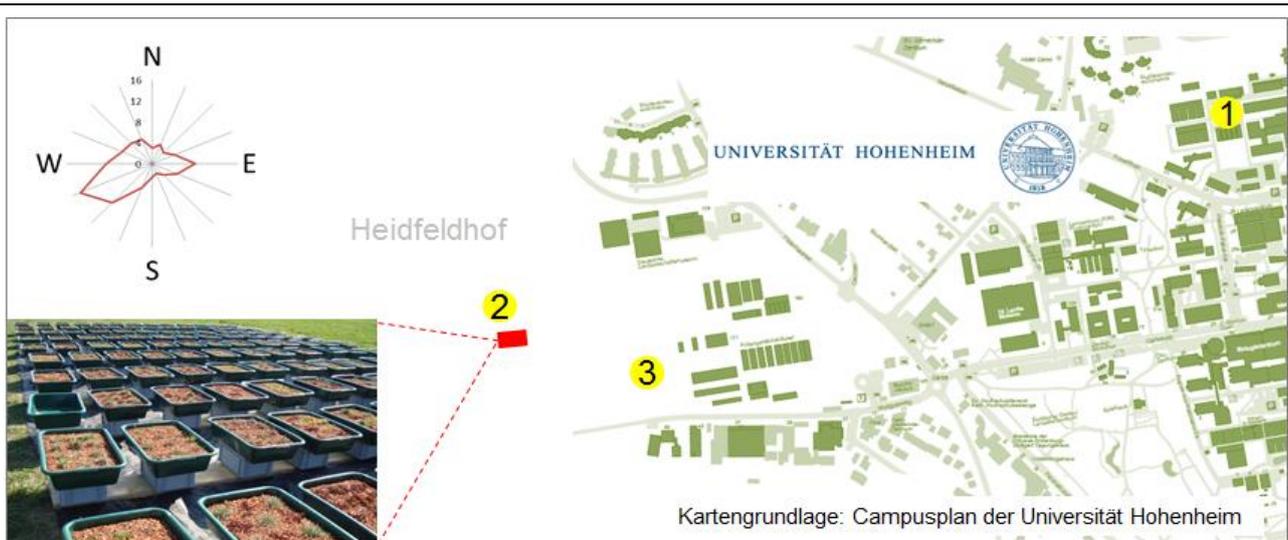


Abbildung 4: Schema zur Lage der anfangs auf dem Campusgelände der Universität Hohenheim (1) und ab dem 20. November 2013 auf dem Heidfeldhof (2) genutzten Untersuchungsfläche, sowie die Lage der Wetterstation Hohenheimer Gärten (3). Lage der Untersuchungsfläche auf dem Heidfeldhof (rot) und daneben ein Übersichtsphoto der Anlage. Die Windrose oben links zeigt die Windklassenstatistik (in % aufgeteilt nach 16 Sektoren) basierend auf Langzeitdaten (1960-1980) von der DWD-Station Stuttgart-Flughafen.

Die während des Versuchs regelmäßig ermittelten **Durchflussmengen** sollten Aussagen zur artspezifischen Wassernutzungseffizienz in den untersuchten Kleinbeständen (Schalen bzw. Mesokosmen) geben. Dazu mussten die Schalen regelmäßig angehoben werden, um das in den Wasserbehältern gesammelte Wasser entnehmen zu können. Das durchgelassene Volumen wurde mittels eines 5 L Messbechers bzw. eines Lineals ermittelt und die elektrische Leitfähigkeit sowie der pH des Perkolats bestimmt, um die Menge gelöster Stoffe und ausgetragener Wasserstoffionen (H^+) ableiten zu können. Es wurde erwartet, dass sich über die Zeit durch die Pflanzen modulierte, signifikante Unterschiede in der Stoffspeicherung bzw. -auswaschung der verschiedenen Systeme ergeben würden.

Die Schalen wurden ab Anfang März 2014 ein Mal pro Woche auf einer batteriebetriebenen Paketwaage gewogen. Bei der **Wägung der Systeme** und der gleichzeitigen Bestimmung der Durchflussmengen mussten in der Regel vier Personen helfen. Bei jeder der wöchentlichen Einsätze mussten 128 durchschnittlich 28-40 kg schwere Schalen, also ca. 4.5 t bewegt werden. Aus den Gewichts differenzen von einem zum nächsten Messtermin, der in diesem Zeitraum in Leerschalen gemessenen Niederschlagsmenge und der Menge des Durchflusses, wurde die Menge evapotranspirierten Wassers berechnet. Diese stellt die Menge des über die Pflanzen transpirierten plus der Menge des über die Bodenoberfläche evaporierten Wassers (als Wasserdampf) dar. Dabei konnte nicht zwischen den beiden Teilmengen differenziert werden, wobei der Anteil der Transpiration mit steigender Deckung zunahm. Insgesamt wurden die Schalen im Projektverlauf 26 mal gewogen, d.h. es wurden insgesamt ca. 117 t Material bewegt. Der letzte Termin, an dem die Wägung aller Mesokosmen erfolgte, war der 2. September 2014. Die Untersuchungen werden im Nachgang des Projekts weitergeführt, da damit weitere Ergebnisse zur längerfristigen Entwicklung der Gründachvegetation gewonnen werden können.

Eine fortlaufende **Registrierung der Bodentemperaturen** erfolgte mittels 12 wasserdichter Temperaturlogger (Tiny Tag Plus 2, TGP-4017). Diese wurden nach dem Bepflanzen der Systeme in je zwei Schalen der Monokulturen und der Kontrollen in 5 cm Tiefe eingegraben. Es wurde hiermit überprüft, ob es artspezifische Unterschiede in den Bodentemperaturen gibt. Dazu wurde ein einstündiges Logintervall festgelegt, um die Tagesamplituden in den unterschiedlichen Systemen gut ansprechen zu können. Die Logger wurden etwa alle drei Monate ausgelesen und gemittelte Zeitreihen über jeden Ansatz (fünf Monokulturen, eine unbewachsene Kontrolle) berechnet. Die Wetterdaten während des Versuchs (Lufttemperaturen, relative Luftfeuchtigkeit, Strahlung und Niederschlagsmengen) stammten von einer ca. 1 km südöstlich vom Versuchsgelände (vgl. Abb. 4) entfernten Wetterstation (Hohenheimer Gärten) und wurden über die Homepage des Landwirtschaftlichen Technologiezentrums (LTZ) abgerufen und fortlaufend aktualisiert.

Die unterschiedlich ablaufende **Entwicklung der Pflanzen** wurde mit nichtdestruktiven Methoden erfasst. Hierzu gehörten Erhebungen zur Deckung der eingesetzten Arten, zur Phänologie, zur Vitalität sowie monatliche photographische Aufnahmen (VIS Kamera im Gegensatz zur IR-Kamera). Es wurde erwartet, dass die Zunahme der Deckung und der Ausbildung von dichteren Beständen positive Effekte auf die Kühlleistung haben würde.

Anhand **thermografischer Aufnahmen** mit einer Infrarotkamera (InfraTech Dresden, VarioCAM® hr) sollten vergleichende Aussagen zur Kühlwirkung bzw. Aufheizung der unterschiedlichen Pflanzenarten bzw. Mischungen und den unbewachsenen Referenzflächen sowie zu zeitlichen Veränderungen und Unterschieden zwischen einzelnen Pflanzenarten gemacht werden. Thermographische Ansätze werden oft in Untersuchungen zum Trockenstress bei Pflanzen zur Visualisierung von Behandlungsunterschieden eingesetzt (z.B. Jones et al. 2009, Zia et al. 2012, John-Bejai et al. 2013). Mittels ausgewählter Aufnahmen lassen sich die

entsprechenden Effekte gut dokumentieren, jedoch eignen sich Fotos ganzer Bestände nicht gut zur quantitativen Erfassung von Temperaturunterschieden. Bei der systematischen Thermometrie zeitlich wiederholter Aufnahmen vieler Messobjekte müssen unterschiedlichste Aspekte berücksichtigt werden, um eine Standardisierung der Messungen vornehmen zu können (vgl. Übersichtsartikel von Maes & Steppe 2012 und Costa et al. 2013). Dementsprechend erfolgte im Projektverlauf zunächst eine Erprobungsphase, bevor ein Standardmessprotokoll entwickelt werden konnte.

Bei dem eingesetzten Messsystem der Kamera ergibt ein 2.8 mm breites Objekt in 1 m Messabstand einen Pixel. Die Messdistanz im Versuch (Abstand zwischen Linse und der Schale) betrug 55 cm, so dass ein Pixel laut Bildfeldrechner (<http://www.infratec.de/de/thermografie/waermebildkamaras/variocamr-high-definition.html>) einer Fläche von $1.54 \times 1.54 \text{ mm}^2$ entsprach. Seit Anfang März 2014 erfolgten Aufnahmen, die mit Hilfe der Software IRBIS® 3 plus ausgewertet wurden. Die thermometrischen Aufnahmen erfolgten unter mehr oder weniger optimalen Bedingungen (klarer, sonniger Tag, relative Windstille) bei immer den gleichen Einstellungen der Kamera und zielten darauf ab, Differenzen zwischen den einzelnen Systemen bezüglich der Aufheizung und möglicher Kühleffekte bestimmter Arten bzw. -kombinationen aufzuzeigen. Da es dabei vorrangig um Temperaturunterschiede zwischen den Systemen und nicht um absolute Temperaturen bestimmter Elemente ging, erfolgten nur exemplarische Erhebungen zu unterschiedlichen Emissivitäten der Bodenoberfläche und den fünf Pflanzenarten.

Die Messung der insgesamt 130 Schalen nahm anfangs mehr als 2h Zeit in Anspruch. Da sich während dieses Zeitraums mitunter große Unterschiede der Umgebungstemperatur bzw. der Aufheizung der Schalen ergeben konnten, wurden die Messungen in der Mittagszeit durchgeführt. Die Strahlung und die Temperaturen erreichen dann ein Plateau, während bei morgendlichen Messungen der rasche Temperaturanstieg großen Einfluss auf die Messung haben würde und dazu führen könnte, dass unterschiedliche Oberflächentemperaturen der 15 Systeme zu stark durch den zeitlichen Temperaturgradienten überlagert würden.

Da von jedem System acht Wiederholungen gemessen werden mussten und die Messungen über den gesamten Zeitraum erfolgen sollten, wurden die Messungen daher komplett randomisiert. Somit konnten Mittelwerte der Temperaturen pro System aus acht zu unterschiedlichen Zeiten gemachten Messungen berechnet werden. In den Standardabweichungen zu diesen Mittelwerten war aber der zeitliche Temperaturgradient immer noch enthalten. Daher wurden bei jeder Messung trockene und feuchte Referenzobjekte mit in das Sichtfeld platziert, die den gleichen Umgebungsbedingungen (Wind, Sättigungsdefizit der Luft, Hintergrundstrahlung) ausgesetzt waren wie die zu betrachtenden Pflanzen. Dabei wurden 5 cm breite kreisförmige Scheiben eines grünen Schwammtuchs benutzt. Laut Costa et al. (2013) eignet sich die Nutzung der Referenztemperaturen von „künstlichen Blättern“ gut zum Nachweis der Transpirationskühlung, da dann keine theoretischen Betrachtungen zur Nettoisothermstrahlung von Blättern bei unterschiedlichen Lufttemperaturen erfolgen müssen. Während der thermometrischen Messungen erfolgte zusätzlich die Messung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR, Kipp & Zonen Meteoron Gerät) und der Temperaturen der künstlichen Blätter mittels Thermoelementen (Extech HD200), um die zeitlichen Gradienten ansprechen zu können.

Nach der Anfertigung der thermometrischen Aufnahmen erfolgte die Auswertung der IR-Bilder mittels der Software IRBIS® 3.0. Die Bilder wurden eingelesen und es wurden mit den kreisförmigen und rechteckigen Auswahltools die Flächen der feuchten und trockenen Referenzflächen sowie der zentralen Messfläche selektiert (s. Abb. 5). Nach der Berechnung der Mittelwerte und statistischen Kenngrößen der drei ausgewählten Flächen, wurden die Daten zur weiteren Bearbeitung nach Excel® exportiert. Von den Temperaturen der zentralen Messfläche wurden die Referenztemperaturen der feuchten und trockenen künstlichen Blätter subs-

trahiert (ΔT_{feucht} und $\Delta T_{\text{trocken}}$), um die Daten mit voll und gar nicht transpirierenden Blättern vergleichen zu können. Schließlich wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen aller Variablen für die acht Wiederholungen pro System und der Kontrollen berechnet, um Vergleiche zwischen den Temperaturunterschieden anstellen zu können. Insgesamt konnten an sechs Terminen repräsentative Messungen der Oberflächentemperaturen durchgeführt werden, jedoch ließ die kühl-nasse Witterung im späteren Sommer keine weiteren Messungen zu.

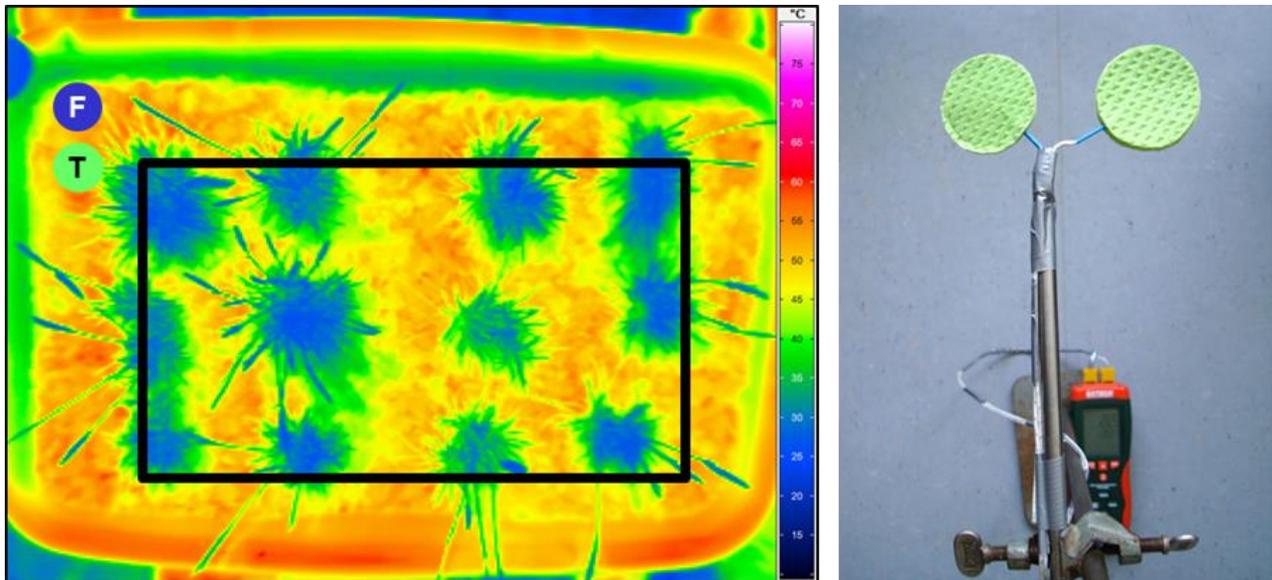


Abbildung 5: Links: Infrarotaufnahme einer Schale (Monokultur *Koeleria glauca*): Rechteck = zentrale Messfläche zur Bildauswertung (durch äußere Pflanzmittelpunkte verlaufend); Kreise links oben = künstliche Blätter in der Infrarotaufnahme (F = feucht, erscheint blau bzw. kühler, T = trocken, erscheint grün bzw. wärmer). Rechts: Am Stativ montierte künstliche Blätter, inklusive der daran angebrachten Thermolemente.

Schließlich wurde nach einer rund einjährigen Dauer des Versuchs am 2. September 2014 bei der Hälfte der Systeme eine (destruktive) **Ernte der oberirdischen Biomasse** durchgeführt. Es findet in der Praxis normalerweise kein Schnitt bzw. keine Abfuhr toter Biomasse statt, da sich die Pflege von Gründächern auf ein Minimum beschränken sollte. Es ist aber gut möglich, dass ein zur rechten Zeit durchgeführter Verjüngungsschnitt bei vielen Arten zu einer Regeneration der Pflanzen führt und somit die Wuchsleistung, Vitalität und damit auch das Vermögen zur Wasserretention und Kühlwirkung längerfristig positiv beeinflusst werden. Ein Nachteil ist, dass die Transpirationsleistung kurzfristig komplett einbricht und erst mit dem Wiederaufwuchs wieder in Gang gesetzt wird. Ein weiterer Nachteil könnte sich aus der verstärkten Auswaschung von Stoffen infolge des Schnitts ergeben. Es ist beabsichtigt, den Versuch weiterzuführen und die unterschiedliche Entwicklung geschnittener und ungeschnittener Mesokosmen weiter zu untersuchen. Neben der Beobachtung zum Wiederaufwuchs und der Deckungszunahme sollen die Schalen weiterhin in regelmäßigen Abständen gewogen werden und die Perkolatqualität untersucht werden.

Bei der Ernte der Sprossmasse wurden die in den Mesokosmen wachsenden Pflanzen nach den verschiedenen Pflanzenarten getrennt eingetütet, sprich in einer Dreiermischung wurden drei Arten separat geerntet. Von jeder Art wurden Frischgewichte und nach einer Trocknung bei 105°C in einem Trockenschrank auch die Trockengewichte bestimmt, so dass Vergleiche der Produktivität vorgenommen werden konnten. Da jeweils notiert wurde, wie viele Individuen einer Art in einem Mesokosmos vorhanden waren (bei einer 100%-igen Überlebensrate 12 in der Monokultur, 6 in der Zweifach- und 4 in der Dreifachmischung), konnte für jede Art auch das Gewicht pro Pflanze berechnet werden. Hiermit konnten Aussagen zur intra- und interspezifischen Konkurrenz der fünf eingesetzten Arten gemacht werden. Zudem konnte die Produktivität ins

Verhältnis zur evapotranspirierten Wassermenge gesetzt werden, um die Wassernutzungseffizienz (WNE oder Englisch: WUE) berechnen zu können. Es wurde erwartet, dass Produktivität und Wassernutzungseffizienz bei den Dreifachmischungen höher sein sollten als in den Zweiermischungen bzw. Monokulturen, da es in Mischungen zur ökologischen Einnischung bzw. effizienteren Ressourcennutzung („resource complementarity“) kommt. Ebenfalls wurde erwartet, dass Mesokosmen mit der Leguminose *Lotus* produktiver sein würden. Nach der Ernte wurden repräsentative Individuen jeder Art aus dem Boden ausgewaschen, um deren Wurzelsysteme beschreiben zu können. Es ist davon auszugehen, dass Wurzelarchitektur und -größe einen Einfluss auf die Wasserretention haben.

3.2 GEWÄCHSHAUSEXPERIMENTE ZU AUSGEWÄHLTEN PFLANZENARTEN

In einem zweiten unter Gewächshausbedingungen erfolgten Versuch sollten Wachstum, anatomische und thermische Eigenschaften ausgewählter Pflanzenarten untersucht werden, um nähere Informationen zu den Interaktionen zwischen Transpirationsverlusten und den Blatttemperaturen zu erhalten. Solche Informationen können bei der Auswahl zur Dachbegrünung geeigneter Pflanzenarten von Bedeutung sein. Die Auswahl der Arten basierte auf einheimischen, an Trockenheit angepassten Arten (z.B. hohe Ellenberg-Temperaturzahlen) der Stuttgarter und Heidelberger Listen (vgl. Tabelle A1). Eine ähnliche, auf der Flora von Extremstandorten, Ellenberg-Werten und bestimmter Pflanzeigenschaften basierende Liste geeigneter Gründacharten wurde unlängst für Italien vorgelegt (Caneva et al. 2013). Viele der darin enthaltenen 138 Pflanzenarten sind auch in Mitteleuropa heimisch.

Keimtests und Bestimmung der relativen Wachstumsraten: Das Samenmaterial für die Versuche wurde über die Wildsaatgutfirmen Appels Wilde Samen und die Rieger Hofmann GmbH bezogen und unter Standardbedingungen über mehrere Monate kultiviert. Die Aussaat erfolgte in mit LD80 Einheitserde (Acht GmbH Vechta) befüllte Pikierschalen am 6. Dezember 2013. Vor der Aussaat wurden die 1000-Korngewichte der Samen bestimmt. Die Auflaufraten von zwei mal 100 Samen pro Art wurden über die nachfolgenden Tage notiert. Zur Bestimmung der relativen Wachstumsraten (RWR) wurden am Tag 7 und am Tag 21 nach Keimbeginn zufällig ausgewählte Keimlinge einer Art geerntet. Für diese Untersuchung standen genügend Keimlinge von 37 Arten bereit.

Austrocknungsversuche und Thermographie: Nach den Keimtests und der Bestimmung der relativen Wachstumsraten wurden die Keimlinge der Arten Mitte Januar 2014 in mit Einheitserde LD80 und Sand im Verhältnis 1:2 (vol:vol) gefüllte Töpfe (\varnothing 9 cm, A: 63.6 cm² und V: 344 cm³) überführt. Die pikierten Pflanzen wurden fortan auf dem Pflanztisch im Abstand von einigen Tagen randomisiert, so dass sie in etwa gleichmäßigen Beleuchtungsverhältnissen ausgesetzt waren. Im anschließenden standardisierten Austrocknungsversuch sollten vor allem die Transpirationsverluste und die Blatttemperaturen betrachtet werden.

Die Austrocknungsversuche wurden am 24. Februar 2014, d.h. 80 Tage nach der Aussaat begonnen. Insgesamt standen dafür 34 der am 6.12.2013 ausgesäten 50 Arten zur Verfügung. Bei den Arten 15, 22 und 45 waren allerdings nur 2 Wiederholungen vorhanden. Die Arten waren zu diesem Zeitpunkt unterschiedlich weit entwickelt. Während z.B. *Papaver rhoeas* und *Plantago media* schon weit entwickelt waren, hatten die Pflanzen von z.B. *Linum perenne* und *Allium schoenoprasum* bislang nur wenig Biomasse gebildet. Bei dem Versuch wurde wie folgt vorgegangen: Sämtliche Töpfe und fünf unbepflanzte Kontrollen wurden wassergesättigt und mit wassergesättigtem Boden auf ein Startgewicht von 380 g pro Topf eingestellt. In den folgenden Tagen wurden alle 102 Töpfe ein Mal pro Tag gewogen, um den Gewichts- bzw. Wasserverlust dokumentieren zu können (s.u.).

Nach den Wägungen wurden thermographische Aufnahmen angefertigt. IR-Fotos wurden an sieben Terminen angefertigt. In der Tabelle 4 sind auch die mittleren Lufttemperaturen während der Messungen angegeben. Die Messdistanz betrug im Versuch 50 cm, so dass ein Pixel einer Fläche von 0.75 x 0.75 mm² entsprach. Bei sehr dünnen Grasblättern könnte es wegen einer zu geringen geometrischen Auflösung von Objekten bei der Auswertung gewisse Messfehler geben, da die Hintergrundtemperatur die Berechnung der Objekttemperatur beeinflussen würde. Bei hohen Hintergrundtemperaturen würde die Blatttemperatur überschätzt, bei geringen unterschätzt. Bei großen Blättern und einer guten Fokussierung der Kamera treten solche Messfehler in der Regel aber nicht auf.

Tabelle 4: Lufttemperaturen an sieben Terminen (T1 bis T7), an denen IR-Aufnahmen erfolgten.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Datum	25.02.2014	26.02.2014	26.02.2014	26.02.2014	27.02.2014	28.02.2014	01.03.2014
Zeit	14:00	8:00	14:00	19:00	14:00	14:00	14:00
°C	30,2	22	27	22	26	33	27,5

Bei der Aufzeichnung und Auswertung der IR-Bilder wurde die Emissivität auf einen Standardwert von 1 gesetzt. Die Emissivität (ϵ) bei einer bestimmten Wellenlänge repräsentiert den Anteil der Strahlung, die von einem Objekt im Verhältnis zu einem schwarzen Körper emittiert wird. Alle nicht schwarzen Objekte absorbieren und leiten einen Teil der Strahlung weiter und reflektieren den Rest, so dass die Emissivität von Objekten und verschiedenen Materialien stark schwankt (Jones et al. 2003; Costa et al. 2013). Pflanzen haben eine Emissivität zwischen 0.91 und 0.97, während Böden in der Regel Werte zwischen 0.6 und 0.95 aufweisen. Heller Sand hat Werte von lediglich 0.89 und Aluminiumfolie Werte zwischen 0.04 und 0.06. Laut Maes & Steppe (2012) kann wegen der geringen Unterschiede zwischen Boden und Pflanze in Studien mit Pflanzen die Emissivität auf einen Standardwert gesetzt werden.

Nachdem die Bilder aller Pflanzen von sieben Messterminen (insgesamt 714 Dateien) in die IRBIS® 3 Software eingelesen worden waren, wurden manuell zehn zufällig gewählte Messpunkte auf den Blättern gesetzt. Die Mittelwerte, Maxima, Minima und Standardabweichungen dieser Messwerte wurden für jede Datei bestimmt und zur weiteren Bearbeitung nach Windows Excel® exportiert.

Wenn mindestens zwei Wiederholungen einer Art ein Gewicht von unter 280 g aufwiesen, wurde die jeweilige Art geerntet. Nach der Bestimmung der Blattfläche - die Pflanzen hatten in der Regel noch nicht viel Stängelmasse gebildet - wurde die Sprossstrockenmasse nach 24 h Trocknung bei 80°C ermittelt. Zusätzlich wurde die Wurzelstrockenmasse ermittelt, um Spross-Wurzel-Verhältnisse bestimmen zu können. Die Blattfläche wurde ins Verhältnis zur Sprossstrockenmasse gesetzt, um von jeder Art mittlere spezifische Blattflächen (SLA) berechnen zu können. Diese geben mitunter Auskunft über die Blattdichte. Hohe Werte repräsentieren dünne Blätter, geringe Werte sind zumeist typisch für kompakte Blätter.

Das trockene Sprossmaterial wurde nach dem Versuch fein vermahlen, um darin **Nahinfrarotspektren (NIRS)** bestimmen zu können. Die Spektren wurden mit einem Unity-Gerät für die Wellenlängen 680 (sichtbares Licht) bis 2500 nm (mittleres Infrarot) aufgenommen und es sollte geklärt werden, ob die unterschiedlichen Absorptionsmuster in der Trockenmasse der verschiedenen Arten in einem Verhältnis zu deren Temperaturverhalten standen.

Die nach dem Austrocknungsversuch übrigen Pflanzen sollten im Gewächshaus bis zum Blühbeginn weiterkultiviert werden, um Aussagen zur phänologischen Entwicklung der eingesetzten Arten machen zu können. Im Versuch kamen jedoch nur wenige Arten zum Blühen, da die meisten Arten erst im zweiten Jahr zur Reproduktion gelangen.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 EXPERIMENTE ZUR KÜHLWIRKUNG VON PFLANZENBESTÄNDEN

4.1.1 WETTERVERLAUF

In den ersten Wochen nach der Bepflanzung der Systeme herrschte insgesamt recht mildes Herbstwetter und es gab in diesem Zeitraum noch keine Nachtfröste. Die Winterperiode fiel insgesamt mild aus, die mittleren Tagestemperaturen fielen selten unter 0°C, Schneereignisse waren von geringer Intensität und vermochten keine geschlossene Schneedecke zu bilden. Nach dem Beginn der neuen Vegetationsperiode, ab etwa Mitte Februar 2014, setzte eine Trockenperiode ein, geprägt durch wenige Niederschlagsereignisse von geringer Menge und mittleren Tagestemperaturen, die deutlich über dem langjährigen Mittel lagen. Ab Anfang Mai lagen sowohl die Temperaturen als auch die Niederschlagsmengen wieder im Bereich des langjährigen Mittels, jedoch kam es zu Pfingsten zu einer ungewöhnlich heißen Wetterlage. Eine zweite Hitzewelle trat Mitte Juli 2014 auf, danach war es aber deutlich kühler und feuchter als im Langzeitmittel. Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Lufttemperaturen und Niederschläge in Hohenheim bis zum 9. September 2014 im Vergleich zu Langzeitwerten.

Die Betrachtung der kumulierten Temperatursummen (fortlaufende Addition der Gradtage über 5°C) lässt den Schluss zu, dass die Vegetationsruhe im Winter 2013/14 insgesamt deutlich kürzer war als im langjährigen Mittel. Zudem setzte die Vegetationsperiode im Jahre 2014 wesentlich früher ein und es gab über die gesamte Saison trotz der kühlen Witterung ab Mitte Juli mehr Wärme als im Langjahresmittel. Bei den Niederschlagssummen war zu erkennen, dass im Herbst und Winter 2013 in etwa gleich viel Wasser zur Verfügung stand wie im langjährigen Mittel, jedoch lagen die Niederschlagssummen ab Anfang März 2014 deutlich unter den Langzeitwerten. Auch in den folgenden Frühlings- und Sommermonaten wurden die Langzeitmittelwerte deutlich unterschritten. Erst nach dem Einsetzen der kühl-nassen Witterung Mitte Juli 2014 und einzelnen Starkregenereignissen näherte sich die Jahresniederschlagssumme dem Langzeitwert und überschritt diesen schließlich am 26. August 2014.

Aufgrund der schlechten Witterung und der meist starken Bewölkung konnten ab Ende Juli 2014 keine thermographischen Messungen mehr erfolgen (vgl. Kapitel 4.1.5). Die dann vermehrt auftretenden Starkregenereignisse erwiesen sich aber als günstig, die Wasserretention der Dachvegetation infolge solcher Spitzen zu überprüfen. Insgesamt war aber die Kombination trocken-warmer Bedingungen im Frühsommer des Jahres 2014 eine gute experimentelle Voraussetzung für die Untersuchung der Mikroklima regulierenden Wirkung der extensiven Dachbegrünungsvegetation, da solche Bedingungen auch im Rahmen des Klimawandels immer öfter auftreten werden.

4.1.2 PFLANZENENTWICKLUNG

Die Bepflanzung der Versuchsgefäße (Schalen bzw. Systeme oder Mesokosmen) Ende September 2013 verlief insgesamt zur vollsten Zufriedenheit. Sämtliche Pflanzen gingen an und ihr Wachstum profitierte von dem spätsommerlichen Wetter Mitte bis Ende September 2013. Einige der *Lotus*-Pflanzen starben jedoch im Frühjahr ab und mussten ersetzt werden. Dies kann zum einen durch das außergewöhnlich trockene Frühjahr bedingt worden sein, aber auch dadurch, dass diese Art als einzige nicht als pflanzfertiger Topfballen einge-

pflanzt werden konnte, sondern die Pflanzen selbst gezogen werden mussten. Die Topfballenpflanzen hatten bei Lieferung in etwa eine vergleichbare Größe, woraus sich bei der Pflanzdichte von 12 Pflanzen pro Schale eine in etwa gleiche Pflanzendeckung, die mit ca. 10% im Mittel geschätzt wurde (s.u.), ergab. Die Deckung der mit *L. corniculatus* bepflanzen Systeme lag aber etwas darunter. Die in einigen Schalen aufgelaufenen Pflanzenarten, die nicht Gegenstand der Untersuchung sein sollten, wurden manuell gejätet. Als nicht erwünschte Beierarten wurden einzelne Individuen von *Sonchus arvensis*, *Senecio vulgaris*, *Taraxacum officinalis*, *Poa annua*, *Urtica urens* und *Lamium purpureum* beobachtet.

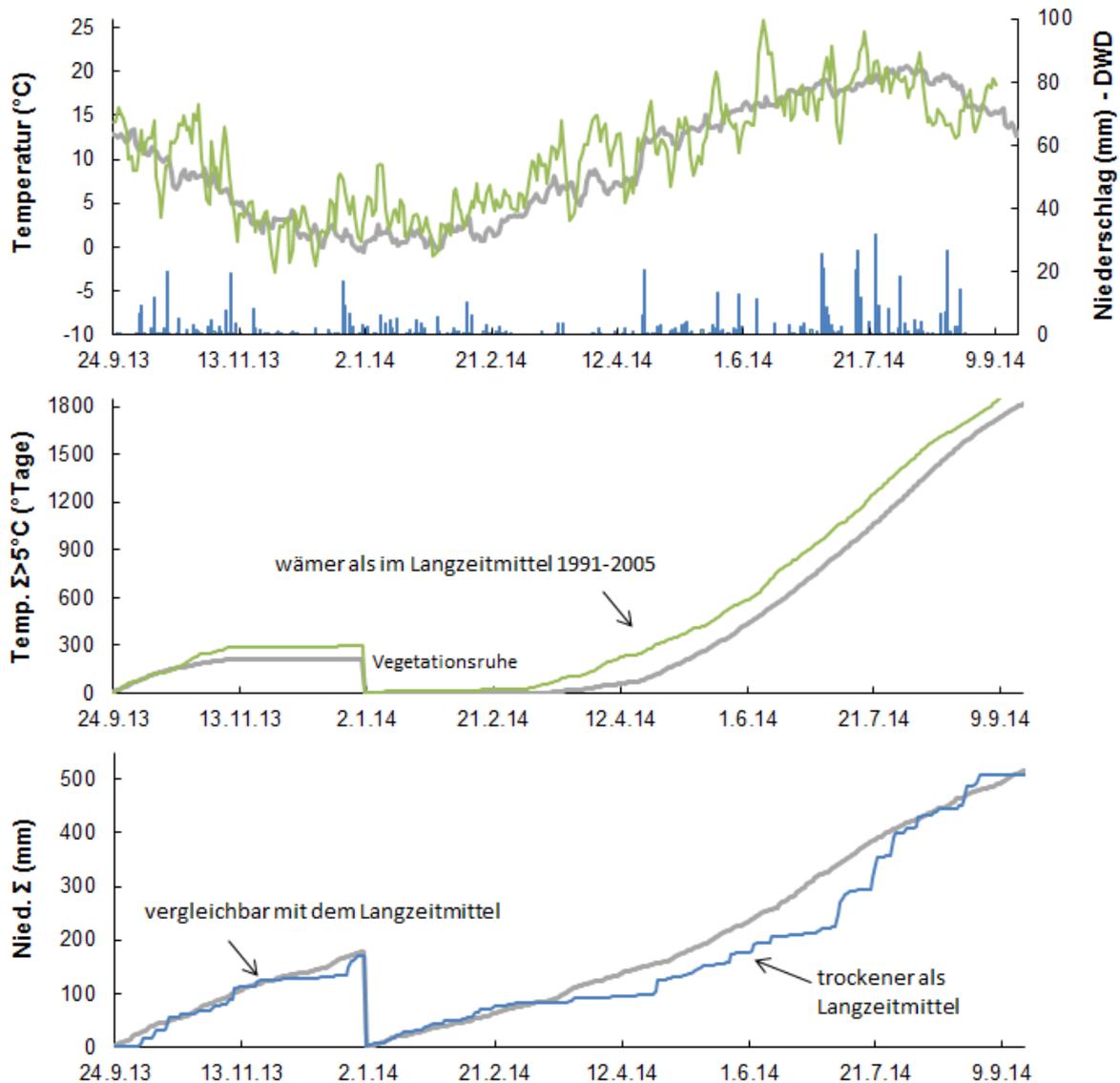


Abbildung 6: Oben: Verlauf der Lufttemperaturen (grüne Linie) im Vergleich zu den Langzeitmittelwerten (graue Linie) und Verlauf der Niederschläge (blaue Balken, 2. Y-Achse). Die aktuellen Klimadaten sowie die berechneten Langzeitwerte (1991-2005) basieren auf Daten der DWD-Station Stuttgart-Flughafen. Mitte: Gradtagzahlen über einer Temperaturschwelle von 5°C, ab der Pflanzenwachstum stattfindet. Unten: Fortlaufende Niederschlagssummen gegenüber Langzeitwerten (graue Linie). Temperatur- und Niederschlagssummen wurden am 1. Januar auf null gesetzt.

Die phänologische Abfolge des Blühbeginns gestaltete sich wie folgt: Bereits Ende März (25.03.14) blühten die ersten Pflanzen von *Dianthus carthusianorm*. Drei Wochen später folgten erste Blüten von *Lotus corniculatus* (16.04.14) und *Phedimus floriferus* begann Ende April zu blühen (30.04.14). Weitere drei Wochen später zeigten sich erste Blüten von *Koeleria glauca* (20.05.14). *Thymus serpyllum* begann erst Mitte Juni zu blühen (10.06.14). Eine zweite Blühphase wurde im Spätsommer (Anfang August 2014) bei *Lotus* und *Dian-*

thus beobachtet. Normalerweise ist eine zweite Blüte bei diesen Arten auch am natürlichen Standort zu beobachten, allerdings wurden die starke Zunahme der Deckung und der Biomassezuwachs (s. unten) bei diesen Arten vor allem auf die im August 2014 mäßig warme und feuchte Witterung zurückgeführt. Unter trockenen Bedingungen wäre ein Wiedereergrünen und –aufblühen weniger ausgeprägt.

Neben ästhetischen Aspekten bei der Blühabfolge und einem langen Blühfenster von *Dianthus* und *Phe-dimus* (März/April bis September/Okttober), könnte sich auch die zeitlich unterschiedliche Ökophysiologie der in Mischungen wachsenden Arten positiv auf Wasserretention und die Kühlwirkung auswirken, da nicht alle Pflanzen zur selben Zeit Nährstoffe und Wasser benötigen und sich Einspareffekte ergeben können. Abbildung 7 zeigt Fotos des Versuchsaufbaus sowie von blühenden Pflanzen.



K. glauca

L. corniculatus

D. carthusianorum

T. serpyllum

P. floriferus

Abbildung 7: Übersicht zum Versuchsaufbau (oben: 26.03.14 und 26.05.14, Mitte: 23.07. und 20.08.14) und Detailaufnahmen von blühenden Pflanzen der fünf eingesetzten Arten (unten).

Die Abbildung A1 im Anhang zeigt eine visuelle Übersicht der Entwicklung der Pflanzen im zeitlichen Verlauf, geordnet nach den 15 Ansätzen zusätzlich der Kontrollen (Nummern der Ansätze vgl. Tabelle 3). Gut zu erkennen ist die zunehmende Bodendeckung aufgrund des verstärkten Wachstums. Besonders die Mono-

kulturen von *Koeleria glauca*, *Lotus corniculatus* und *Phedimus floriferus* sind diesbezüglich auffällig (Reihen 1, 2 und 5), ebenso die 2er und 3er Mischungen, in welchen diese Arten vertreten sind (Reihen 7, 12, 13 und 14). In vielen der Schalen konnte zum Ende des Versuchs eine über 70%ige Deckung festgestellt werden, bei manchen Schalen war sogar eine 100%ige Deckung vorhanden (vgl. Abb. 8).

Infolge der über Pfingsten (7. bis 9. Juni 2014) sehr heißen Witterung wurden bei *Lotus* und *Dianthus* erste Trockenschäden beobachtet und es kam nachfolgend zum Absterben einzelner Individuen. Nach der zweiten Hitzewelle Anfang Juli 2014 wurde schließlich ein massives Sterben der Pflanzen von *Thymus* beobachtet. In den Monokulturen starben bis Mitte des Monats sämtliche Pflanzen, während die meisten Pflanzen in den Mischkulturen überlebten. Hauptgrund des Absterbens des Zwergstrauchs war vermutlich die Trockenheit, jedoch können Pflanzenkrankheiten (z.B. Pilzbefall) nicht ausgeschlossen werden. Die Trockenrasenart sollte eigentlich an extreme Trockenheit angepasst sein, jedoch konnte im Versuch nicht geklärt werden, was die Ursache für das massive Absterben war. Interessanterweise ermöglichten die Mischkulturen (Nr. 9, 11, 13 und 15 vgl. Tabelle 3) dem Sandthymian eine höhere Überlebensrate. Ein Grund hierfür könnte die erwähnte bessere Ausnutzung bzw. Verteilung von Ressourcen zwischen verschiedenen Arten sein. In der Praxis könnte dies bedeuten, dass *Thymus* nicht in einzelnen Clustern gepflanzt werden sollte. Es sollte auch geklärt werden, welche Pflanzenkrankheiten bei dieser Art auftreten können und ob es gegenüber diesen resistente Sorten gibt.

Abbildung 8a gibt einen Überblick darüber, wie viele der anfangs gepflanzten Individuen am Ende des Versuchs überlebt hatten. In den Monokulturen wurden pro Art 12 Pflanzen gepflanzt, in den Zweiermischungen waren es sechs Pflanzen pro Art und in den Dreiermischungen vier Individuen pro Art. Zu einhundert Prozent überlebten die Individuen des Grases *Koeleria* und der Sukkulente *Phedimus*. Sie gelten damit als robust bzw. langlebig und besonders geeignet für die Anlage von extensiven Gründächern. Auch *Dianthus* erwies sich als recht robust und langlebig. Der Vorteil dieser Art ist aber vielmehr, dass sie sehr stark ausstaudet und sich über Diasporen gut regenerieren kann. *Lotus* erwies sich in Monokulturen und in Mischung mit *Phedimus* als recht stabil, in den Dreiermischungen starben aber viele Individuen ab. Dennoch bildeten die wenigen überlebenden Individuen dieser Art eine sehr hohe Biomasse und Deckung (s. unten). Die Ergebnisse zeigen, dass *Lotus* recht variabel ist, aber bei günstigen klimatischen Bedingungen wie der feuchten Witterung ab Mitte Juli 2014 aus einzelnen Ausläufern sehr schnell wieder austreiben kann. Der Vorteil der Leguminose ist vor allem in der Stickstofffixierung zu sehen, wovon die anderen Arten profitieren können (s. unten). Es ist zu prüfen, ob mit anderen, ggf. robusteren und weniger stark wüchsigen Leguminosen wie *Medicago lupulina* L. (Hopfenklee) bessere Ergebnisse zu erzielen sind.

Abbildung 8b stellt die mittlere prozentuale Deckung der einzelnen Ansätze im zeitlichen Verlauf von drei Messterminen dar. Die Ansätze mit den Monokulturen von *Koeleria glauca* (1) und *Dianthus cartusianorum* (3) wiesen im Gegensatz zu den anderen Systemen durch ihren horstartigen Wuchs nur einen geringen Zuwachs der Deckung auf. Die Deckung der Dreiermischungen war insgesamt am größten (etwa 70%), was sich durch die optimale Flächennutzung aus dem Zusammenspiel des Habitus unterschiedlicher Arten (z.B. horstartiges Gras plus Bodendecker) ergab. In weiteren Untersuchungen sollte überprüft werden, ob eine Erhöhung der Pflanzdichte horstartig wachsender Arten zur Optimierung der Bodendeckung führen kann. Abbildung 8c zeigt schließlich die Entwicklung der Deckungsgrade über den gesamten Zeitraum. Zum einen ist darin der komplette Einbruch der *Thymus*-Monokulturen zu sehen und die stetig wachsende Deckung der auf den robusten Arten *Koeleria* und *Phedimus* aufbauenden Mono- und Mischkulturen. Es ist aus Gründen der allmählichen Erhöhung der Deckungsgrade von Gründachbeständen daher anzuraten ein „Gerüst“ aus

diesen Arten zu pflanzen, in welches andere Arten (Kräuter und Leguminosen) gepflanzt werden bzw. sich über Samen etablieren können.

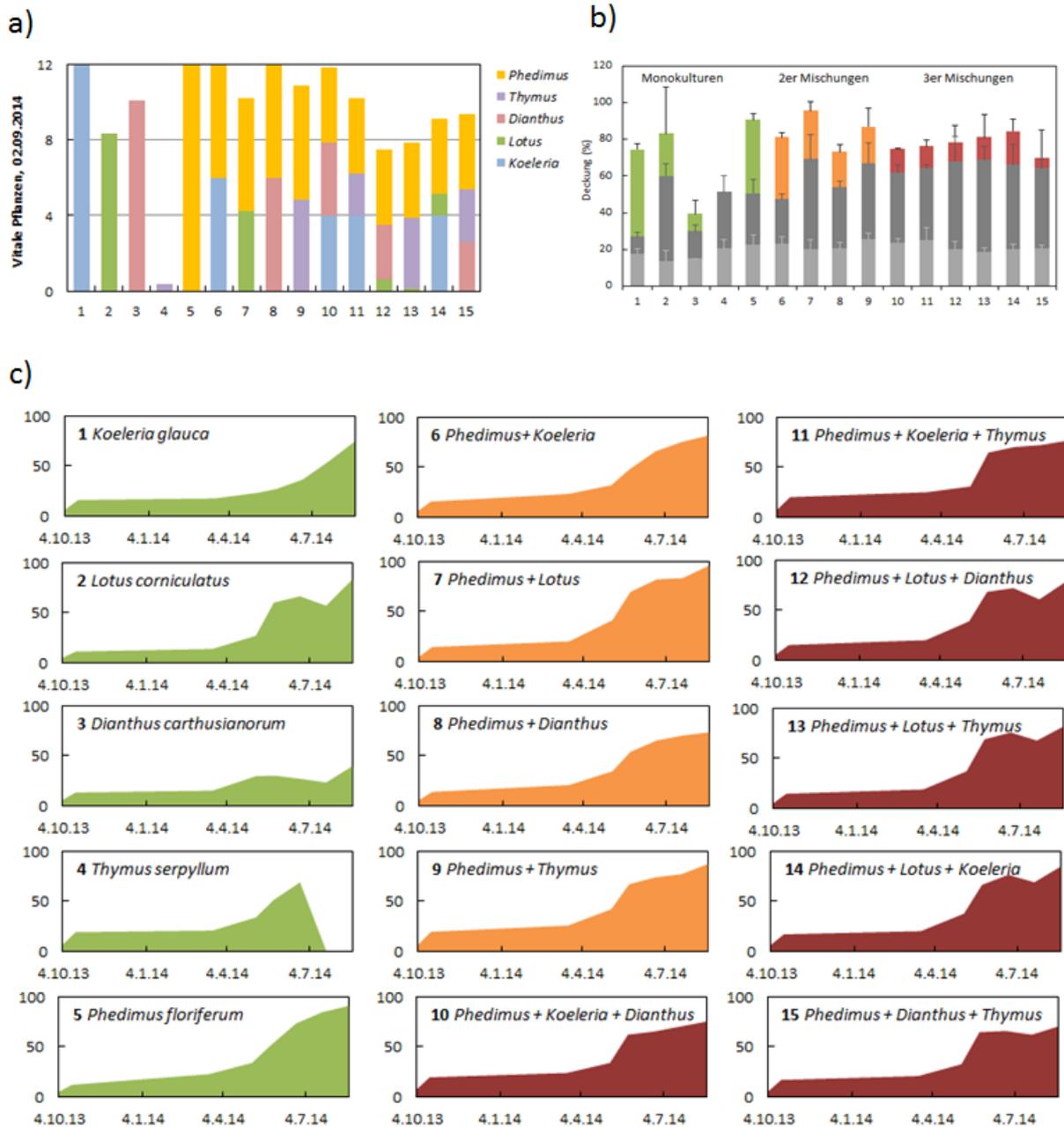


Abbildung 8: a) Die zu Ende des Versuchs in den Monokulturen und Mischungen ermittelte Zahl der überlebenden Pflanzen. Sollzahl in den Monokulturen (Nr. 1 bis 5): 12 Individuen, in den Zweiermischungen (Nr. 6 bis 9): 6 pro Art und in den Dreiermischungen (Nr. 10 bis 15): 4 Pflanzen pro Art. b) Mittlere Deckung (%) der Bestände (\pm Standardabweichungen) in den einzelnen Systemen im zeitlichen Verlauf. Die einzelnen Messtermine: 19.03.14 (hellgrau), 26.5.14 (dunkelgrau) und 21.8.14 (bunt). c) Veränderungen der Deckung (%) in den Mesokosmen als Flächendiagramm über den gesamten Zeitraum der Untersuchung.

4.1.3 BIOMASSEPRODUKTION

In Ergänzung zur Ermittlung der Deckungsgrade und der Unterschiede in der Wachstumsleistung der 15 Mesokosmentypen wurde die Hälfte der Schalen am 2. September 2014 geerntet. Abbildungen 9a und b zeigen zunächst die Trockenmasseanteile und mittleren Gewichte von Einzelpflanzen der fünf Arten in den 15 Ansätzen. Dabei wurde das Trockengewicht einer Art auf die zu Ende des Versuchs in der Schale tatsächlich

vorhandene Zahl noch lebender Individuen bezogen. Die sukkulente Art *Phedimus* hatte erwartungsgemäß die geringsten Trockenmassenanteile bzw. die höchsten Wassergehalte von über 80%, gefolgt von *Koeleria*, welche einen Trockenmasseanteil von 43% aufwies. Die geringen Standardabweichungen der Trockenmasseanteile dieser Arten bestätigen wiederum, dass die Arten gleichförmige Individuen bildeten, die sich hinsichtlich ihrer Ökophysiologie nicht so stark wie die der andern Arten unterschieden.

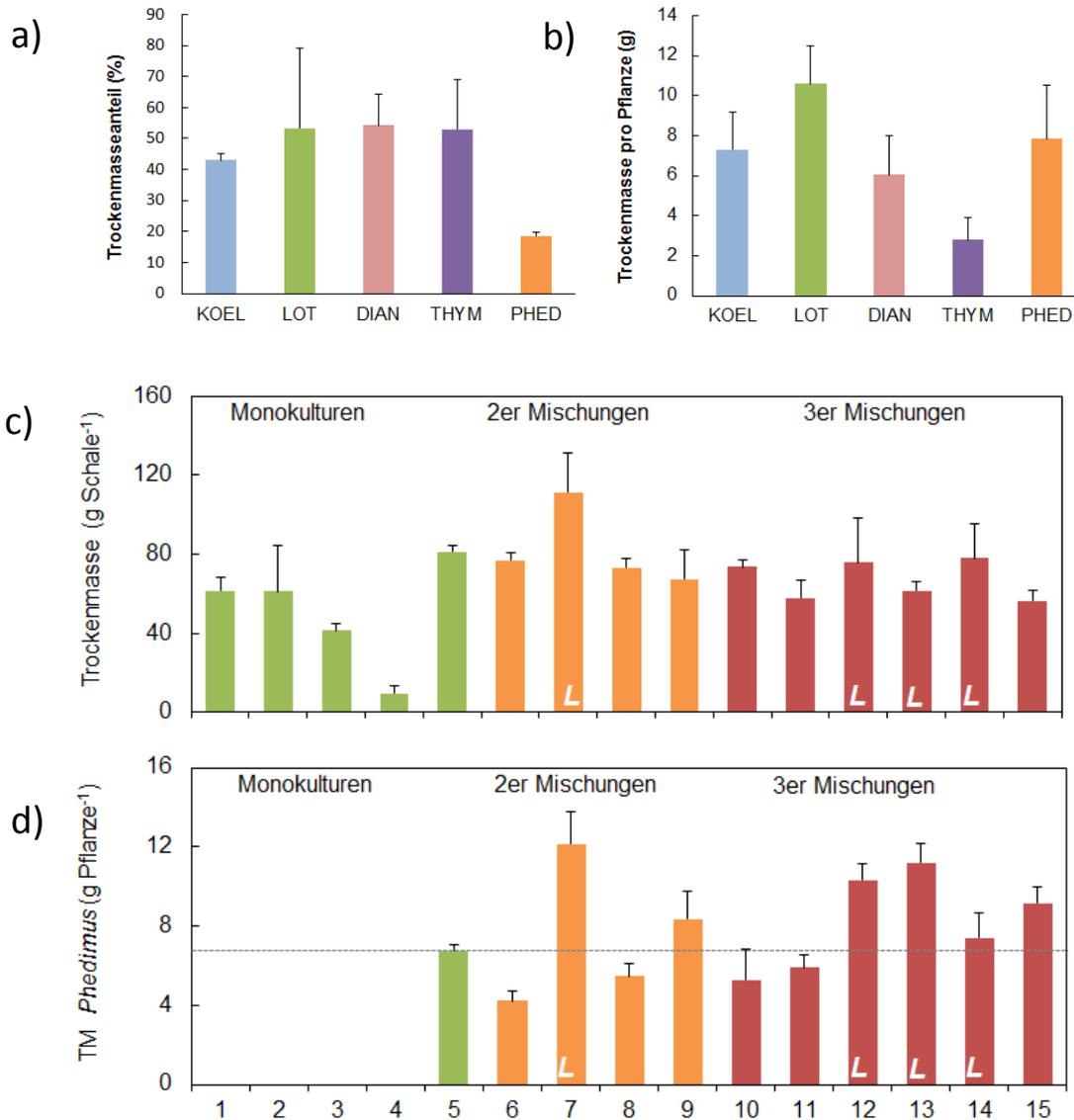


Abbildung 9: **a)** Mittlere Trockenmasseanteile der fünf untersuchten Arten in den Mono- und Mischkulturen. **b)** Mittlere Produktivität eines Individuums in den Mono- und Mischkulturen. **c)** Mittlere Trockenmasse pro Schale gebildeter Trockenmasse. **d)** Trockengewicht pro Pflanze von *Phedimus* in Mono- und Mischkulturen. Zu den Nummern der Mesokosmen-Ansätze vgl. Tabelle 3. „L“ bezieht sich auf Mischungen, in denen die Leguminose „*Lotus*“ vorhanden war.

Neben der Menge des perkolierenden und evapotranspirierenden Wassers kann auch die in der Sprossmasse gebundene Wassermenge einen gewissen Einfluss auf die Vitalität und das thermische Verhalten von Pflanzen haben. Die im Spross enthaltene absolute Wassermenge berechnete sich aus der Differenz zwischen der Frisch- und der Trockenmasse. Aufgrund seiner sukkulenten Lebensform konnte *Phedimus* deutlich mehr Wasser in seiner Sprossmasse halten als die anderen Arten. Im Mittel über alle Mesokosmen konnte die Art 182 g Wasser pro Schale im Spross binden, also ca. 3.4 mal so viel wie *Koeleria* (54 g) und *Lotus* (52 g), 6.7 mal so viel wie *Dianthus* (27 g) und sogar 15 mal mehr als *Thymus* (12 g). Die im Spross der Sukkulenten

gespeicherte bzw. festgelegte Wassermenge entspricht jedoch nur weniger als einem Tausendstel des Jahresniederschlags und die Art transpiriert deutlich weniger Wasser als die anderen Arten (s. Kapitel 4.1.5).

Bezüglich der Wuchsleistung erwies sich die Leguminose *Lotus* im Mittel am produktivsten und der Zwergstrauch *Thymus* am unproduktivsten (siehe Abbildung 9b). Das Gras und die Sukkulente waren insgesamt wüchsiger als die krautige Art *Dianthus*, aber waren mit 7.3 bzw. 7.8 g Trockenmasse im Mittel gleich produktiv. Die Ergebnisse der pro Schale gebildeten mittleren Trockenmasse zeigten eine starke Beziehung zu der am 20. August 2014 letztmalig geschätzten mittleren Deckung (R^2 0.78). Die größte Trockenmasse pro Schale wurde in der Zweifachmischung von *Phedimus* und *Lotus* gebildet, wohingegen die Monokulturen von *Thymus* und *Dianthus* am wenigsten Trockenmasse bildeten. Während dies bei *Thymus* daran lag, dass bei der Ernte die Biomasse fast ausschließlich aus bereits abgestorbenen Pflanzen bestand, könnte die geringere Sprossmasse bei *Dianthus* daran liegen, dass die Pflanzen viel Biomasse in Samen investiert hatten, die aus den Kapseln herausgefallen waren und bei der Ernte und Wägung nicht miterfasst werden konnten. Sowohl bei den mittleren Deckungen als auch bei der Produktivität erreichten die Zweifachmischungen die höchsten Mittelwerte, gefolgt von den Dreifachmischungen, welche aber immer noch höhere Deckung und Produktivität als die Monokulturen aufwiesen (vgl. Abb. 8b und 9c). Dies bestätigt wiederum, dass sich eine höhere Diversität positiv auf die Entwicklung und das Wachstum von Pflanzenbeständen auswirken kann. Es kann aber vermutet werden, dass nach dem Überschreiten einer bestimmten Individuengröße und bei extremer Ressourcenknappheit so starke Konkurrenz auf die Partner ausgeübt wird, dass es zu nachteiligen Effekten bis zum Absterben einzelner Individuen kommt. In der Praxis sollte daher eine bestimmte Pflanzendichte aufrecht erhalten werden bzw. sollten von Zeit zu Zeit bestandsregulierende Maßnahmen (Nachpflanzen bzw. Nachsaat konkurrenzschwacher und Entfernen starkwüchsiger Individuen) ergriffen werden. Interessanterweise deutete die Präsenz der Leguminose *Lotus* auf positive Effekte im Wachstum einzelner Bestände hin (s. Abb. 9d). Die Förderung dürfte auf dessen Vermögen zur Fixierung von Luftstickstoff zurückgehen. So war die mittlere Trockenmasse pro Pflanze bei der Art *Phedimus* in 2er-Mischung mit *Lotus* erhöht und auch *Lotus* profitierte in der 2er Mischung mit *Phedimus*, da hier im Mittel vier von sechs Pflanzen überleben konnten (vgl. Abb. 8 a). Im Gegensatz dazu übte *Koeleria* (Nr. 6, 10, 11) einen starken Konkurrenzdruck auf *Phedimus* aus, der in Kombination mit dieser Art aber auch mit *Dianthus* (Nr. 8) geringere Biomassen pro Pflanze bildete.

Die Ergebnisse zu den Sprosstrockenmassen der Arten in Monokulturen und Mischungen geben auch Aufschluss über Wuchsleistung und Konkurrenz auf flachgründigem Substrat, wie es bei der Anlage von Extensivgründächern benutzt wird (Abb. 9c). Die maximale Trockenmasseproduktion betrug 111 g in der Mischung zwischen *Lotus* und *Phedimus* (System Nr. 7). Pro ha würde dies einer beachtlichen jährlichen Biomasseproduktion von 43 dt pro ha entsprechen. Im Mittel über alle Systeme betrug aber die Produktivität nur 20 dt pro ha. Bei der im Versuch realisierten Düngergabe von 57 kg N pro ha, erbrachte der Einsatz von 1 kg Stickstoff 35 kg Trockenmasse. Dies ist in etwa vergleichbar mit aus der landwirtschaftlichen Praxis berichteten Werten. Von der ober- und unterirdisch gebildeten Biomasse der Pflanzen ist auch ihre CO₂ Speicherkapazität abhängig. So geht aus einem von der Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V.(FBB) in Auftrag gegebenen Bericht (Herfort et al. 2012) hervor, dass insbesondere *Sedum kamtschaticum* mit die höchsten Biomassen bildete und die in der Biomasse gebundenen Kohlenstoffgehalte zwischen 522 g m⁻² und 637 g m⁻² für alle untersuchten Sedumarten lagen. Dies entspräche einer Kohlenstofffixierung von bis zu 2,6 Tonnen pro Hektar.

Eine höhere Düngergabe könnte die mittlere Biomasseproduktion von Gründächern sicherlich steigern, jedoch birgt dies die Gefahr, dass nach einem anfänglichen Wachstumsschub der Vegetation unter günstigen

klimatischen Bedingungen die Pflanzen in einer nachfolgenden Trockenperiode komplett absterben können. Es ist aber dennoch denkbar, dass eine gute Nährstoffversorgung von Gründachpflanzen insgesamt zu einer Verringerung von Trockenstress führt. Ein Indiz hierfür sind Ergebnisse aus der agronomischen Praxis, in der gezeigt wurde, dass die Wassernutzungseffizienz (WUE) von gut mit Nährstoffen versorgten Pflanzen gegenüber wenig gedüngten Pflanzen deutlich besser abschneidet (Brueck 2008). Selbst wenn die Erhöhung der Produktivität der Gründachvegetation kein primäres Ziel der dachgärtnerischen Praxis darstellt, muss eine optimale, auf die Pflanzen abgestimmte Nährstoffversorgung langfristig sichergestellt sein. Eine regelmäßige, mäßige Düngung kann die Aufrechterhaltung der Bestände gewährleisten und ggf. der Dominanz nur weniger Arten bzw. der Ausprägung einer dichten Mooschicht entgegenwirken. In der Pflegepraxis wird aber nur selten gedüngt und es erfolgt keine Abfuhr von abgestorbenem Material, so dass sich schon nach wenigen Jahren wenig diverse Bestände mit einer nur flachen Moos- und Flechtenschicht einstellen (Thuring & Dunnett 2014).

Die hier präsentierten Daten beziehen sich auf die Sprossmasse und lassen Aussagen über die Konkurrenz um Licht (eher gering), Wasser und Ressourcen zu. Da die Wurzelmassen der Pflanzen nicht bestimmt werden konnten, lassen die Ergebnisse aber keine Aussagen zu Wurzel bedingten Konkurrenzeffekten, zwischenartlichen Unterschieden hinsichtlich der Nährstoff- und Wasseraufnahme bzw. zur wachstumsfördernden Wirkung z.B. über Mycorrhizen zu. Abbildung 10 zeigt aber exemplarische Aufnahmen von bei der Ernte ausgewaschenen Wurzeln und der bei *Lotus* gefundenen Wurzelknöllchen. Zur möglichen Bedeutung der unterschiedlichen Wurzelmasse und –architektur bei der Wasserretention sei auf Kapitel 4.1.4 hingewiesen.

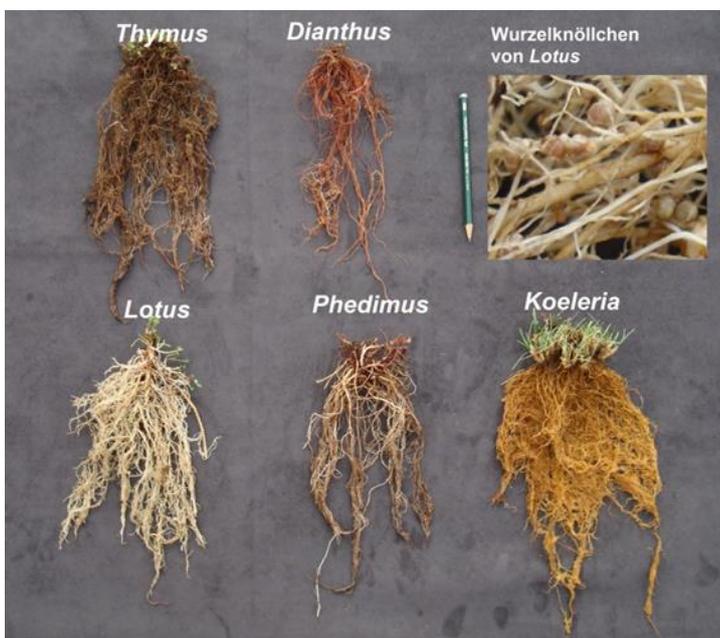


Abbildung 10: Exemplarischer Vergleich von Wurzeln der fünf in den Versuchen benutzten Pflanzenarten sowie Detailaufnahme von Wurzelknöllchen der Leguminose *Lotus corniculatus* (rechts oben).

4.1.4 WASSERRETENTION

Bei Betrachtung der in den 15 unterschiedlich bepflanzten Systemen gesammelten Perkolatmengen lassen sich für die kumulative Menge über den gesamten Versuchszeitraum leichte Unterschiede in der Niederschlagsretention aufzeigen (Abbildung 11). Über den fast einjährigen Zeitraum wurden in den Leerschalen ($A=0.26 \text{ m}^2$) 176 L Wasser aufgefangen (vgl. blauer Balken in Grafik), was auf den Quadratmeter hochgerechnet eine Niederschlagsmenge von 678 mm bzw. L m^{-2} ergibt. Diese Menge entspricht in etwa dem für

Hohenheim typischen Langzeitmittel für Jahresniederschläge von 698 mm (https://www120.uni-hohenheim.de/_mittel_und_extremwerte).

Gemäß den Richtlinien für Dachbegrünung ist eine effektive Wasserretention bei extensiven Systemen erst ab einem Mindest-Deckungsgrad von 60% gegeben (FLL 2008). Dieser Deckungsgrad wurde in fast allen bepflanzten Systemen im Mittel erreicht bzw. weit überschritten. Die Ausnahme bildeten zum Versuchsende die *Thymus*-Monokultur (4) mit 0% und die *Dianthus*-Monokultur (3) mit 40% Deckung (vgl. Abb. 8b). In den unbepflanzten Kontrollen (vgl. weißer Balken) wurden im Mittel 145 L Durchfluss gemessen, was einer Niederschlagsretention von 18% gleichkommt. Der Wasserrückhalt basiert vor allem auf der Sammlung einer gewissen Menge Wassers in den Speichermulden des Floradrain® FD25 Drainelements (vgl. Kapitel 3.1). Pro Regenereignis kann ein komplett leeres System 2,6 L aufnehmen. Diese Menge entspricht einer Wassermenge von 10 L pro Quadratmeter. Im Mittel über alle Mesokosmensysteme wurden über den gesamten Zeitraum 124 L Durchfluss ermittelt. Gegenüber der unbepflanzten Kontrolle entspricht dies einer Wasserretention von 14% und gegenüber dem Niederschlag einer Retention von 30%.

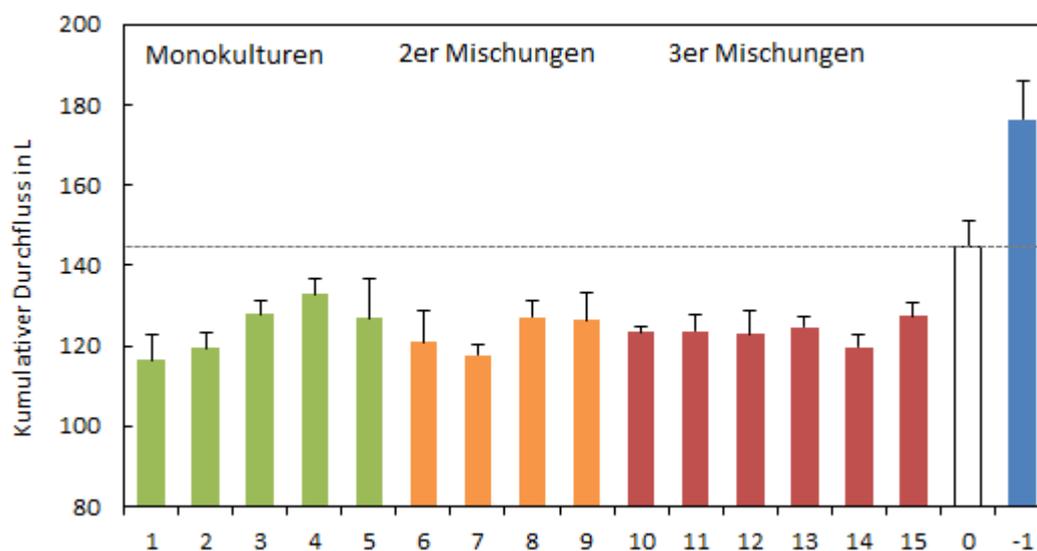


Abbildung 11: Die kumulativen mittleren Durchflussmengen (\pm Standardabweichungen) der 15 Pflanzsysteme (Varianten bzw. Nummern vgl. Tabelle 3) und der Kontrollen (weißer Balken) im Vergleich zur Niederschlagsmenge (blauer Balken) über den gesamten Betrachtungszeitraum (24. September 2013 bis 2. September 2014). Gestrichelte Linie ermöglicht den Vergleich der bepflanzten Mesokosmen mit der Kontrolle.

Betrachtet man jedoch nur die kumulative Perkolatmenge ab Ende Februar 2014 bis Anfang September 2014, also ab Beginn der neuen Vegetationsperiode und nach der erfolgreichen Etablierungsphase der Pflanzen, so zeichnen sich deutlichere Effekte und Unterschiede zwischen einzelnen Ansätzen ab (Abbildung 12). In dem sechsmonatigen Zeitraum wurden in den Leerschalen insgesamt 109 L (entspricht einer Niederschlagsmenge von 418 mm) gesammelt. In den Kontrollen wurden 84 L aufgefangen, was einer Niederschlagsretention von immerhin 23% allein durch den Systemaufbau entspricht. Im Mittel über alle Mesokosmen bzw. Monokulturen und Mischungen wurden Perkolatmengen von 67 L gemessen. Gegenüber der unbepflanzten Kontrolle ist dies eine Wasserretention von 21% und gegenüber den Gesamtniederschlägen sogar eine Reduktion um 39%.

Zu erkennen ist zunächst, dass durch jegliche Bepflanzung der Durchfluss gegenüber den unbepflanzten Kontrollen signifikant verringert war. Bei den Monokulturen erwiesen sich die Systeme mit *Koeleria* (1) und *Lotus* (2) als besonders effektiv, aber auch die 2er Mischungen Nr. 6 und 7 sowie die 3er Mischung Nr. 14,

in denen diese Arten vertreten waren, zeigten geringe Mengen an kumulativem Durchfluss auf. Ähnliches wurde auch von der Untersuchung von Nagase & Dunnett (2012) berichtet, in der weniger Abfluss (runoff) unter Grasarten (*Koeleria macrantha*) im Vergleich zu Sedumarten gefunden wurde. Auch Lundholm et al. (2010) und MacIvor & Lundholm (2011) bestätigen die beste Wasserspeicherung für Gräser (*Deschampsia flexuosa*) gegenüber krautigen Pflanzen, Sukkulente und Sträuchern. Der geringere Durchfluss kann zum einen auf eine höhere Transpirationsrate der *Koeleria* zurückzuführen sein (vgl. Abbildung 14), aber auch mit deren Wurzelarchitektur zu tun haben. Laut Starry (2013) haben besonders der Wurzeltyp und die Wurzelstruktur einen Einfluss auf die Wasserretention. Bei der exemplarischen Untersuchung der Wurzeln (vgl. Abb. 10) wies das Gras *Koeleria* den typischen homorhizen Bewurzelungstyp auf, bei dem viele gleich starke Seitenwurzeln ausgeprägt werden. Bei den anderen, dikotylen Pflanzenarten war eine Hauptwurzel mit kleineren Seitenwurzeln vorhanden. Während bei *Thymus*, *Koeleria* und *Lotus* viele kräftige Wurzeln zu finden waren, gab es bei den Wurzeln von *Phedimus* und *Dianthus* nur wenige Seitenwurzeln. Es ist also durchaus denkbar, dass die perkolierte Wassermenge von der Masse, Länge und der Struktur der Wurzeln beeinflusst war. So könnten wenige dicke Wurzeln ggf. weniger Wasser zurückgehalten haben, als ein aus vielen kleineren, stark verzweigten Wurzeln bestehender dichter Wurzelfilz wie bei der *Koeleria*. Zudem lässt sich auf dem Hintergrund der Untersuchungen von Lamont & Bergl (1991), Rixen & Mulder (2005), sowie Nagase & Dunnett (2012) vermuten, dass sich bei der Kombination von unterschiedlichen Pflanzenarten auch eine komplementäre Nischenausnutzung der Wurzelsysteme etabliert hat bzw. durch die Inklusion von mindestens einer Spezies mit hoher Absorptionsrate (hier *Koeleria*) die Wasserretention positiv beeinflusst wird.

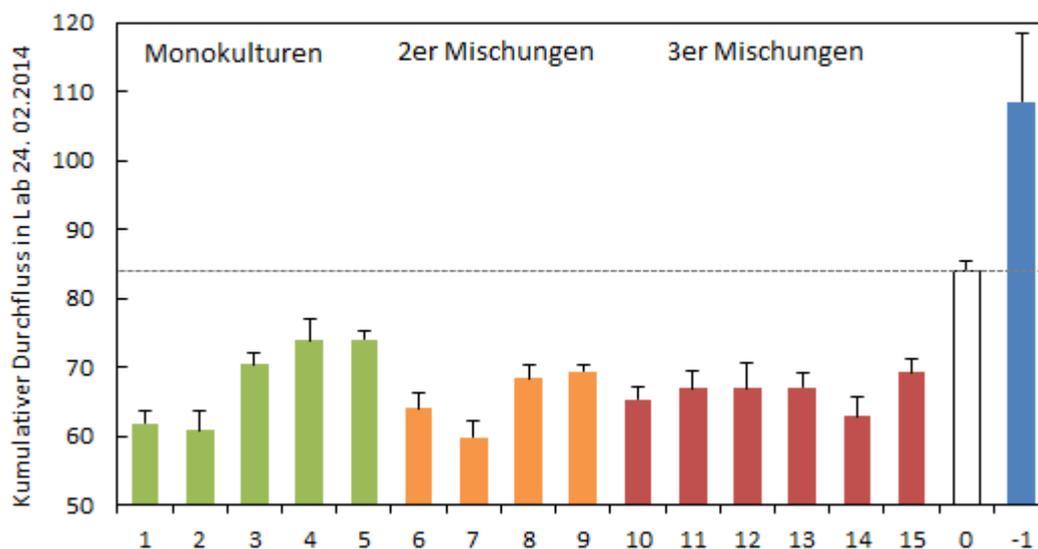


Abbildung 12: Die kumulativen mittleren Durchflussmengen (\pm Standardabweichungen über acht Wiederholungen) der 15 Pflanzsysteme (Varianten bzw. Nummern vgl. Tabelle 3) und der Kontrollen (weißer Balken) im Vergleich zur Niederschlagsmenge (blauer Balken) zwischen 24. Februar und 2. September 2014 (entspricht in etwa dem Sommerhalbjahr). Gestrichelte Linie ermöglicht den Vergleich der bepflanzten Mesokosmen mit der Kontrolle.

Die höchsten Durchflussmengen fanden sich bei der *Phedimus* Monokultur (5). Die Wasserretention relativ zur Kontrolle betrug in diesem Ansatz lediglich 12%. Ein Grund für den vergleichsweise hohen Abfluss könnte in der flachen Wuchsform und den glatten Blättern der Art liegen. Auch das geringe Oberflächen-zu-Volumen Verhältnis der dickfleischigen Blätter dürfte Abspüleffekte begünstigen, da sich anders als bei stark gegliederten Oberflächen z.B. bei *Koeleria* kein Interzeptionswasser sammeln bzw. anhaften bleiben kann (Clark 1940; Yu et al. 2009; Garcia-Estringana et al. 2010; Nagase & Dunnett 2012). Eine weitere Ur-

sache könnte das vergleichsweise schwach ausgebildete Wurzelwerk von *Phedimus* mit wenigen, starken Wurzeln und die mögliche Drainagerinnenbildung sein (vgl. Abb. 10). Die hohen Perkolatmengen bei der Monokultur von *Thymus* gehen auf das Absterben der Individuen im Juli 2014 zurück.

Fassman-Beck (2013) fand im Vergleich zu diesen Ergebnissen bei ihren Untersuchungen extensiv begrünter Dächer in Neuseeland kumulative Retentionsraten zwischen 39% und 57% für Substratstärken zwischen 5 und 15 cm und einer nicht näher definierten Bepflanzung mit einheimischen Arten. DeNardo et al. (2005) berichten von einer mittleren Retention von 45% für mit *Sedum spurium* bepflanzter Systeme. Unbepflanzte Systeme dagegen wiesen bei diesen Laborversuchen nur eine Retention von 34% auf (9cm Substratdicke). Zu einer ähnlichen mittleren Retention von 30% für ein mit einer Sedum-Moos-Mischung bepflanztes Dach gelangt Bengtsson (2005) mit seinen Versuchen zu Spitzenabflusswerten bei einer Substratdicke von lediglich 3cm. In den Versuchen von Connop et al. (2013) hatte die etablierte komplexe Vegetation eine höhere Wasserretention als die *Sedum*-basierte Vegetation. Allerdings wurde in der Londoner Veröffentlichung nicht erwähnt, um welche Sedumart es sich handelte. Zudem beziehen sich die präsentierten Daten zur Wasserretention nur auf einen kurzen Zeitraum von Juli bis Dezember 2010.

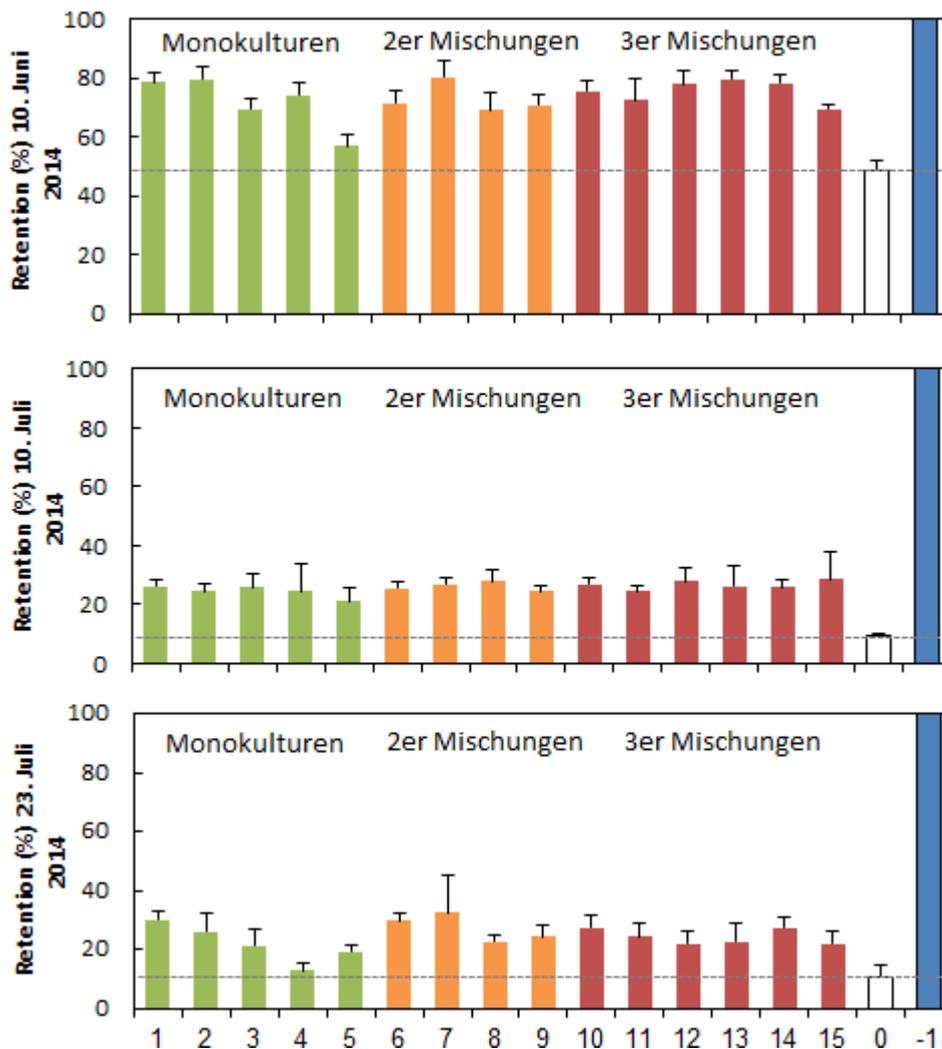


Abbildung 13: Wasserretention (%) der Systeme gegenüber den Kontrollen (weißer Balken, gestrichelte Linie) und dem Gesamtniederschlag (blauer Balken, entspricht 100%) nach dem Starkregenereignis vom 10. Juni 2014 (oben), den Extremniederschlägen vor dem 10. Juli (Mitte) und den Starkregenereignissen vom 20. bis 22. Juli 2014 (unten), bei denen insgesamt 19, 81 und 59 mm Niederschläge fielen.

Einzelne Starkregenereignisse des Sommers 2014 und die wöchentliche Ermittlung der in den Sammelschalen (vgl. Abb. 2) gemessenen Wassermengen boten die mehrmalige Möglichkeit der Erfassung des Niederschlagsrückhalts. Abbildung 13 zeigt die Wasserretention nach den Starkregenereignissen vom 10. Juni, dem 10. Juli und dem 23. Juli 2014. Bei dem ersten Termin gab es insgesamt 19.4 mm Niederschläge in der Form von Hagel und Regen. Die unbepflanzte Kontrolle konnte in ihren Wasserspeicherelementen etwa die Hälfte des Niederschlags zurückhalten. Während die *Phedimus*-Monokultur lediglich 57% des Niederschlags halten konnte, waren es bei *Koeleria* und *Lotus* und einigen Mischungen nahezu 80%.

Trotz mehrerer Starkregenereignisse vor dem 23. Juli 2014, bei denen über mehrere Tage insgesamt 59 mm Niederschlag fielen, waren die bepflanzten Schalen den Kontrollen immer noch überlegen und es waren immer noch Unterschiede in der Niederschlagsretention zwischen den Systemen festzustellen. Bei den extrem hohen Niederschlägen von 81 mm im Vorfeld des 10. Juli 2014, die zur kompletten Sättigung des Substrats führten, verwischten sich die Systemunterschiede aber vollends.

Die in den effektivsten Systemen (*Lotus* und *Koeleria*-Monokulturen) über die Sommermonate maximale zurückgehaltene Wassermenge (Gesamte Niederschlagsmenge-Durchfluß = Rückhalt; 109 L - 61 L = 48 L) entsprach einer Wassermenge von 185 L pro Quadratmeter, die im System verbleiben konnte. Die nachfolgende Verdunstung einer solchen Menge Wassers würde der Umgebungsluft 472 MJ entziehen (die spezifische Verdampfungsenthalpie der Umwandlung von 1 kg Wasser in Wasserdampf beträgt bei 25°C 2.55 MJ pro kg).

4.1.5 EVAPOTRANSPIRATION

Eng gekoppelt mit dem Vermögen Niederschläge zu speichern, sind die Evapotranspiration sowie die Wassernutzungseffizienz der Vegetation. Pflanzen mit hohen Transpirationsraten werden das Substrat schneller austrocknen, was sich auf die Speicherung erneuter Niederschläge positiv auswirken kann. In Bezug jedoch auf eine konstante Kühlwirkung aufgrund einer moderaten Transpirationsrate sowie auf das Vermögen, auch längere Trockenzeiten zu überleben, könnten sich sehr hohe Transpirationsraten als nachteilig für das System erweisen, insbesondere wenn diese einhergehen mit einer übermäßigen Biomassebildung.

Auf Grundlage der wöchentlichen Gewichtsbestimmung der einzelnen Schalen sowie den von der Wetterstation Hohenheimer Gärten (LTZ) registrierten Niederschlagsmengen, ließ sich die mittlere Evapotranspiration der Systeme berechnen. Abbildung 14 zeigt die kumulative Evapotranspirationsmenge in kg seit dem Frühjahr 2014.

Über die Oberfläche der unbepflanzten Kontrollen verdampften in dem sechsmonatigen Zeitraum 31.7 kg Wasser. Diese Menge entsprach einer Evaporation von 122 mm bzw. L pro m². Bei den mit Pflanzen ausgestatteten Mesokosmen kam zu der Evaporation über den Boden die Transpiration über die Pflanzen hinzu. Im Mittel über die 15 Mesokosmen wurde eine Evapotranspirationsmenge von 48 kg, also 51% mehr als die Evaporation ermittelt. Dieser Wert entsprach der in den Mesokosmen zurückgehaltenen Wassermenge.

Die Monokultur mit *Phedimus* (1) wies mit 41 kg die deutlich geringste mittlere Evapotranspirationsmenge auf. Multiple Mittelwertsvergleiche mit dem Tukey post-hoc Test zeigten aber, dass diese Menge nicht signifikant geringer als die Evapotranspiration der Monokulturen von *Thymus* (4) und *Dianthus* (3) war. Im Vergleich zu *Koeleria* (1) und *Lotus* (2) war die Evapotranspiration der drei Monokulturen aber signifikant geringer. Während die geringe Evapotranspiration der *Thymus*-Monokulturen auf das komplette Absterben der

Pflanzen im Juli 2014 zurückging, ist bei *Dianthus* vermutlich die geringe Blattoberfläche ein Grund für die schlechtere Transpirationsleistung. Bei *Phedimus* (5) sind neben morphologischen Anpassungen (Reduktion des Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses bei Sukkulenten) auch ökophysiologische Gründe zu nennen. Diese Art ist eine fakultative CAM-Pflanze, die ihre Transpirationsrate durch Stomatenschluß am Tag absenken kann. Die Art wäre demzufolge nicht optimal geeignet, Wasser im Substrat zu speichern bzw. das System auch am Tage über Transpirationskälte abzukühlen. Auch Compton (2006), Starry (2012), Coutts et al. (2013) und Blanusa et al. (2013) weisen darauf hin, dass Sedumarten mitunter unzuweckmäßig sein können, da viele dieser CAM-Arten deutlich weniger des im System vorhandenen Wassers transpirieren als C3-Pflanzen.

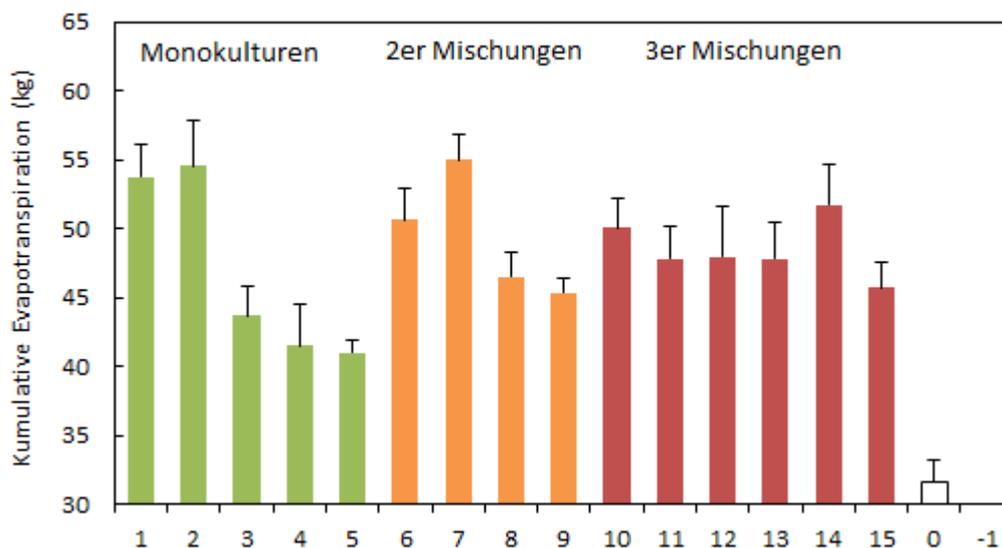


Abbildung 14: Mittlere kumulative Evapotranspiration in kg (\pm Standardabweichungen) der 15 Pflanzsysteme (Varianten bzw. Nummern vgl. Tabelle 3) und der Kontrollen (weißer Balken) über den Betrachtungszeitraum (11.03.2014 – 02.09.2014).

Im Gegensatz hierzu wurde bei den Systemen der Monokulturen mit *Koeleria* und *Lotus*, welche bereits auch die niedrigsten Durchflussraten aufwiesen, die höchste Evapotranspiration beobachtet. Diese Ergebnisse gleichen jenen von Wolf & Lundholm (2008), die zeigten, dass Gräser aufgrund ihrer physiologischen Leistung dem Substrat mehr Wasser in einer kürzeren Zeit entziehen als sukkulente Pflanzen (*Sedum acre*), welche durch ihren bodendeckenden Wuchs die Evaporation zusätzlich verringern. Der horstartige Wuchs der *Koeleria* mit dünnen vertikal ausgerichteten Blättern dagegen setzt atmosphärische Grenzschichtwiderstände herab, woraus sich höhere Transpirationsverluste ergeben können. Bei *Lotus* ging die hohe Transpirationsrate vermutlich vor allem auf das starke Wiederaustreiben Ende Juli 2014 zurück.

Ergänzend zu diesen Ergebnissen zeigt Abbildung 15 die Wassernutzungseffizienz (water-use efficiency, WUE) der 15 Ansätze. Hierbei wurde die kumulative Evapotranspiration ins Verhältnis zur gebildeten Biomasse gesetzt. Innerhalb der Monokulturen ließ sich die höchste Wassernutzungseffizienz für *Phedimus floriferus* nachweisen. Bei minimalem Wasserverbrauch bildete diese Art erwartungsgemäß eine beträchtliche Biomasse (vgl. hierzu auch 4.1.2 Abb. 8 und 4.1.3 Abb. 9). Dies ist vermutlich neben den ökologischen Anpassungen (z.B. reduziertes Blattfläche-zu-Volumen Verhältnis) auch auf die Ökophysiologie der Pflanzenart zurückzuführen. Es konnten jedoch keine Aussagen darüber gemacht werden, ob die Pflanzen während des gesamten Versuchs oder nur zeitweise den CAM- oder der C3-Photosyntheseweg nutzten.

Der Wasserverlust ist eng gekoppelt mit dem Sättigungsdefizit (VPD) der Luft, welches in den Mittagsstunden besonders hoch ist. Da CAM-Sukkulente jedoch ihre Stomata hauptsächlich in den Morgen- und Abendstunden zur Aufnahme von CO₂ öffnen, ist der Wasserverlust über Transpiration bei diesem Photosynthesemechanismus wesentlich geringer. Bereits Körner et al. (1979) zeigten, dass Sukkulente (*Sedum* spp.) innerhalb der von ihnen untersuchten 13 morpho- und ökologisch unterschiedlichen Arten die geringsten maximalen Blattleitfähigkeiten aufwiesen. Auch andere Studien belegen die hohe Trockentoleranz dieser Gattung. Aus einem Übersichtsartikel von Getter & Rowe (2006) geht hervor, dass einige Sedumpflanzen sogar bis zu 2 Jahre ohne Wasser überleben können.

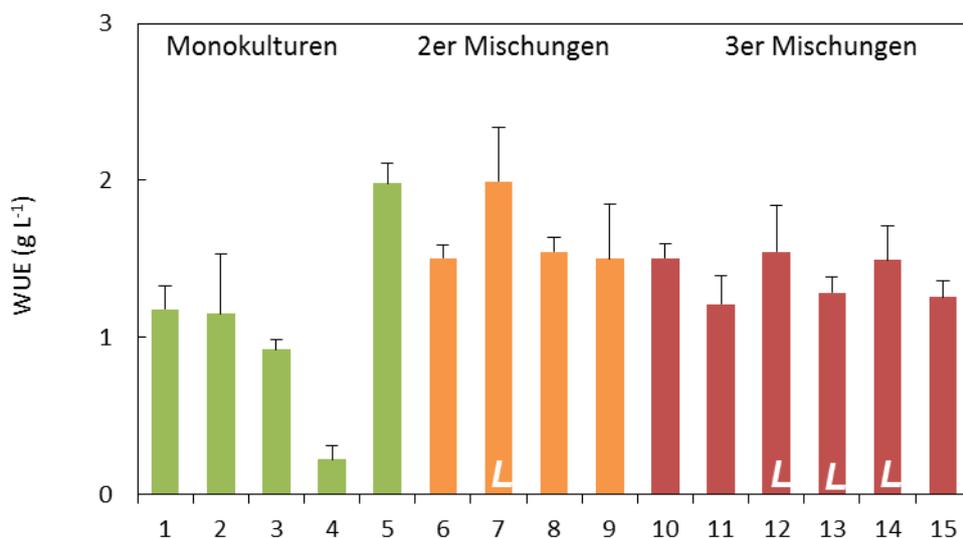


Abbildung 15: Mittlere Wassernutzungseffizienz (WUE) in g L⁻¹ (\pm Standardabweichungen) der 15 Pflanzsysteme (Varianten bzw. Nummern vgl. Tabelle 3). „L“ bezieht sich auf Mischungen, in denen die Leguminose „*Lotus*“ vorhanden war.

In der gegenüber den Monokulturen Nr. 1, 2 und 3 (1,08 g L⁻¹) deutlich erhöhten mittleren Wassernutzungseffizienz der Zweier- und Dreiermischungen (1,63 g L⁻¹ und 1,38 g L⁻¹) kann man den positiven Beitrag von *Phedimus*, der als Basisart in allen Ansätzen fungierte, gut erkennen. Butler & Orians (2011) fanden ebenfalls positive Effekte einer Sedumart auf das Wachstum der mit ihr zusammenwachsenden, weniger Trockenheit vertragenden Pflanzen und bezeichnen Sedum in diesem Zusammenhang als „*nursery plant*“, die als Hort für andere Pflanzen fungiert. In der Ökologie werden solche positiven Effekte einer Art auf die andere als *Fazilitation* bezeichnet.

Die außerordentlich geringe WUE des *Thymus* (4) lässt sich auf das Absterben der Pflanzen und der damit sehr geringen Biomasse (vgl. Abb. 9) zurückführen und kann daher nicht zum Vergleich herangezogen werden. Die Präsenz von *Lotus* in einer Mischung erwies sich nicht nur als positiv hinsichtlich einer gesteigerten Biomassebildung in diesen Ansätzen (vgl. Abb. 9), sondern auch in Bezug auf eine effektivere Wassernutzung. So zeigten die Systeme Nr. 7, 12 und 14, jeweils Mischungen mit der Leguminose, die deutlich höchsten mittleren WUE innerhalb der Mischungen auf. Bereits in Kapitel 4.1.3 wurde darauf hingewiesen, dass die Nährstoff- und Wasserversorgung eng miteinander gekoppelt sind und dass gut mit Nährstoffen versorgten Pflanzen gegenüber schlechter versorgten Pflanzen auch eine höhere Wassernutzungseffizienz haben können (Brueck 2008).

4.1.6 PERKOLATQUALITÄT

Im Betrachtungszeitraum wurden auch Erhebungen zur chemischen Qualität des drainenden Wassers gemacht. Eine Übersicht über die zeitliche Veränderung des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit (electric conductivity, EC) in den Perkolaten zeigt Abbildung 16. Um von der elektrischen Leitfähigkeit auf die Menge gelöster Stoffe (Einheit mg L^{-1}) zu schließen, wird in Untersuchungen zur Wasserqualität oft ein Umrechnungsfaktor von 0.67 benutzt. Abbildung 17 zeigt die kumulativ ausgetragene Stoffmenge, die aus dem Produkt der Niederschlagsmenge und der mit dem genannten Umrechnungsfaktor multiplizierten Leitfähigkeit errechnet wurde.

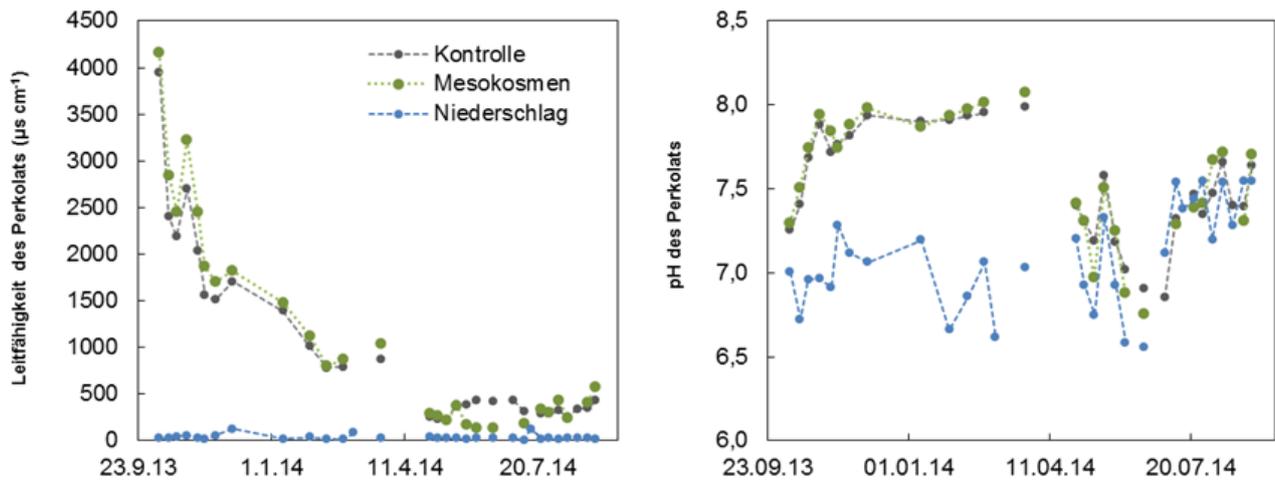


Abbildung 16: Übersicht der in den Perkolaten bestimmten elektrischen Leitfähigkeit (links) und der pH Werte (rechts), dargestellt als Mittelwert der 15 bepflanzten Systeme, der unbepflanzten Kontrollen und der Freilandniederschläge (Varianten bzw. Nummern vgl. Tabelle 3) über den Betrachtungszeitraum 23.09.2013 – 02.09.2014.

Die elektrische Leitfähigkeit nahm insgesamt über die Zeit in allen Systemen stark ab. So betrug sie zu Versuchsbeginn noch über $4000 \mu\text{S cm}^{-1}$, nahm dann kontinuierlich ab und pendelte sich ab Ende April bei Werten unter $500 \mu\text{S cm}^{-1}$ ein. Diese Beobachtung lässt sich gut anhand der ausgetragenen Stoffmenge erklären. Während der Konditionierungsphase des Versuchs im Spätherbst 2013 wurde an den einzelnen Messterminen noch bis zu 20 g Feinmaterial ausgetragen. Es ist davon auszugehen, dass der Boden sich mit der Zeit setzte, verfestigte und ein komplexes Wurzelsystem von den Pflanzen aufgebaut wurde, welches das Substrat zusätzlich stabilisierte. Seit Februar 2014 wurde kaum noch Material aus dem Substrat gewaschen, wodurch die Ionendichte und damit auch die EC im Perkolat stark sank. Allerdings waren ab Mai 2014 bei den unbepflanzten Kontrollen im Mittel deutlich höhere EC-Werte im Perkolat als bei den bepflanzten Systemen festzustellen. Dies deutet darauf hin, dass die Wurzeln mit zunehmendem Pflanzenwachstum mehr Ionen austauschten bzw. im Substrat zu binden vermochten. Das Perkolat der Leerschalen, also des Regenwassers, wies wie erwartet jeweils die geringste Leitfähigkeit auf. Die Werte schwankten zwischen 14 und $125 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Ein gegenläufiges Muster zeigte sich bei der Betrachtung der pH Werte über die Zeit. Während der Konditionierungsphase stiegen die pH Werte im Perkolat kontinuierlich an und erreichten Werte von bis zu pH 8.2 am 25. März 2014. Auch Teemusk & Mander (2007) und Bliss et al. (2009) berichten von erhöhten pH Werten zwischen 7 und 8 im Abfluss von Gründächern im Vergleich zu pH Werten zwischen 6 und 7 im

Regenwasser. So können Gründächer dazu beitragen, schwach saure Niederschläge und die damit einhergehende Versauerung von Vorflutern abzupuffern (Berndtsson 2010).

Nach der Konditionierungsphase war ein starker Abfall der Werte zu verzeichnen. Seit Ende April lagen die Werte der meisten Systeme im neutralen bis schwach sauren Bereich (pH 6.3 -7.6), was auf die Aufnahme basisch wirkender Nährionen von den Pflanzen (z.B. K⁺, Na⁺, Ca⁺, Mg⁺) und die hierdurch bedingte Abgabe von Protonen in die Bodenlösung zurückzuführen sein dürfte. Der erneute Anstieg der pH Werte am 20. Mai 2014 dürfte auf die Düngung am 2. Mai 2014. zurückzuführen sein, wodurch dem Substrat erneut Mineralstoffe zugeführt wurden. Nach einem Monat sanken die Werte jedoch wieder und stiegen zu Ende des Sommers wieder an. Aufgrund der starken zeitlichen Schwankungen und der hohen Standardabweichungen innerhalb eines Systemtyps ließ sich kein System identifizieren, welches kontinuierlich die höchsten bzw. niedrigsten Werte aufwies. Während die *Koeleria*-Monokultur meist die höchsten pH-Werte im Perkolat aufwies, tendierte die *Dianthus* Monokultur meist zu saureren Perkolaten.

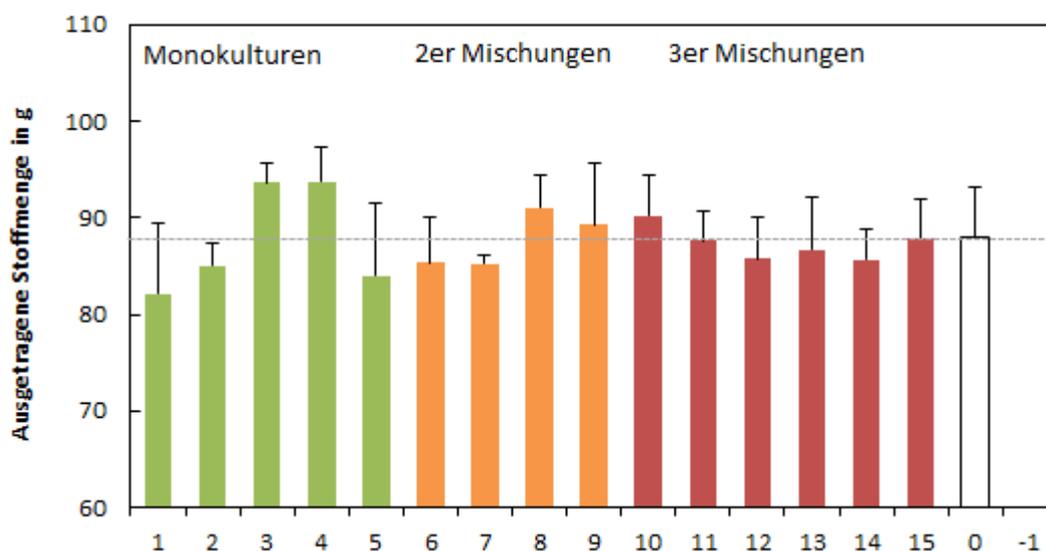


Abbildung 17: Seit Versuchsbeginn bis zum 2. September 2014 mit dem Niederschlag ausgewaschene kumulative mittlere Stoffmenge der 15 Pflanzsysteme und der unbewachsenen Kontrollen (weißer Balken). Varianten bzw. Nummern vgl. Tabelle 3. Gestrichelte Linie ermöglicht den Vergleich zur Kontrolle.

Die ausgetragene kumulative Stoffmenge lag bis zum 2. September 2014 bei den nicht mit Pflanzen bestanden Kontrollen im Mittel bei 88 g. Bezogen auf die anfangs in die Schalen gefüllte Substratmenge, kam dies einem Austrag von 0.3% gleich. Ab Februar 2014 kristallisierten sich leichte Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen heraus. Die Systeme der Monokulturen mit *Dianthus* und *Thymus* (Nr. 3 und 4) zeigten den höchsten Austrag. Aus dem System Nr. 1 (*Koeleria* Monokultur) wurde insgesamt am wenigsten Material ausgetragen, sogar weniger als aus den Kontrollen. Weiterhin wiesen auch die Systeme mit *Phedimus* und *Lotus* geringe kumulative Stoffaustragsmengen auf. Sie gelten damit als bodenstabilisierend bzw. erosionsmindernd.

4.1.7 BODENTEMPERATUREN

Vergleich der Bodentemperatur der Kontrollen mit der Lufttemperatur

Abbildung 18 zeigt die von Versuchsbeginn bis zum 9. September 2014 registrierten Stundenwerte für Luft- und Bodentemperaturen, die Temperaturdifferenzen zwischen beiden und Stundenwerte des Dampfdruckdefizits (VPD).

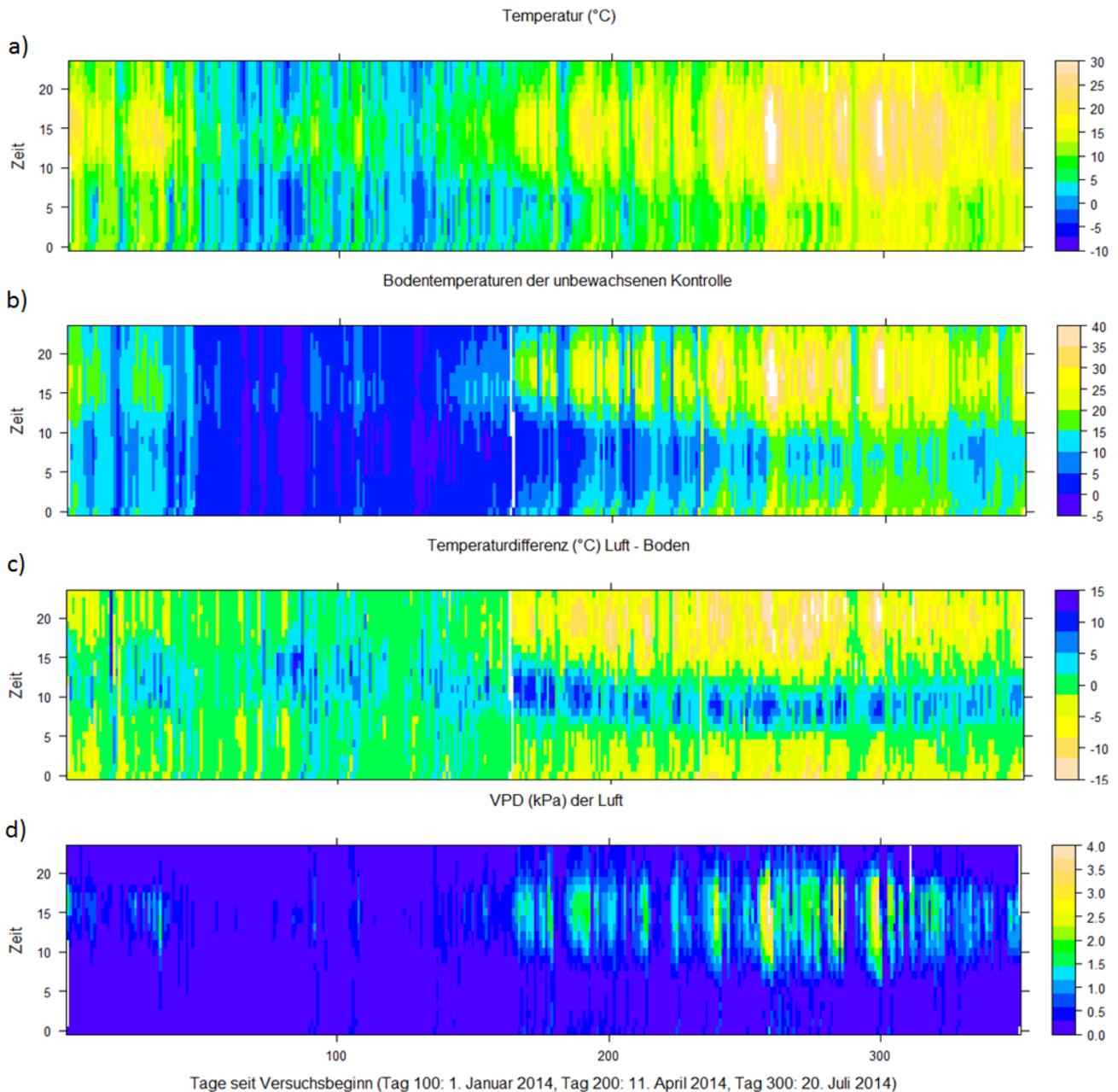


Abbildung 18: Seit dem Versuchsbeginn vom 24. September 2013 bis 9. September 2014 aufgezeichnete Tagesgänge der Lufttemperaturen (a), Bodentemperaturen der unbewachsenen Kontrollen (b) sowie die Temperaturdifferenz zwischen Luft- und Bodentemperaturen (c) und das Sättigungsdefizit der Luft (Vapour Pressure Deficit, VPD) (d). Tage auf der x-Achse, Stunden auf der y-Achse. Erläuterungen im Text.

Blautöne visualisieren in den Abbildungen 18 a und 18 b niedrigere, Gelb- und Orangetöne höhere Temperaturen. Es zeigte sich, dass die Maxima der Lufttemperaturen über die gesamte betrachtete Zeitspanne tagsüber zwischen 10 Uhr und 16 Uhr erreicht wurden, wobei die Maximalwerte im Herbst 2013/14 und im Frühjahr 2014 auf bis zu 25°C, im Sommer 2014 auf über 30°C stiegen. Über die Winterperiode (Tage 50-

160) wurden vereinzelt Maximaltemperaturen von bis zu 15° C erreicht. Tages- und Nachttemperaturen unterschieden sich um bis zu 20°C.

Werden die Bodentemperaturen betrachtet, lagen die Tagesmaxima meist bis zu 10 Grad Celsius über denen der Lufttemperaturen. Das Maximum wurde jedoch zeitversetzt zu den Lufttemperaturen erst zwischen 15 Uhr und 20 Uhr erreicht. Zu erkennen sind auch die geringeren Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht im Bodensubstrat während der Herbst- und Wintermonate. Ab dem Frühjahr (etwa ab Tag 160) und mit zunehmenden VPD (Abb. 18 d) zeigt sich jedoch ein anderes Muster. Mit steigenden Lufttemperaturen überstieg die Amplitude der Bodentemperaturen die der Lufttemperaturen, besonders am Tag. Die Unterschiede zwischen den Tagesmaxima und Tagesminima der Bodentemperaturen betragen nun bis zu 35 °C im Gegensatz zu den Lufttemperaturen (15-20°C).

Bei den Differenzen zwischen Luft- und Bodentemperaturen (Abb. 18 c) zeigte sich, dass in Zeiträumen mit geringeren Tagesamplituden der Lufttemperatur (Spätherbst und Winter) die größten Unterschiede (5-10°C) zwischen Luft- und Bodentemperatur zwischen 10 Uhr und 16 Uhr auftraten und die Luft stets wärmer war als der Boden. Mit einer Zunahme der Sonnenstunden, steigenden Temperaturen und intensiverer Einstrahlung (Frühling etwa ab Tag 160) wurden diese Differenzen größer (um bis zu 15°C) und der Boden war nachmittags, in den Abendstunden und nachts deutlich wärmer als die Luft. Vormittags war aber der Boden kühler als die Luft (blaue Farbe). Schließlich war auch die Verkleinerung dieses Zeitfensters sowie eine Verschiebung hin zu früheren und ab Spätsommer wieder hin zu späteren Tageszeiten (Bogengang) deutlich zu erkennen. Dies ist auf die unterschiedlichen Tageslängen in Abhängigkeit von den Jahreszeiten mit intensiverer und längerer bzw. geringerer und kürzerer Sonneneinstrahlung zurückzuführen.

Zieht man schließlich auch das Sättigungsdefizit der Luft hinzu (Abb. 18 d), kann dieses als Erklärung für die beobachtete saisonale Abhängigkeit des Bodenkühlungseffektes herangezogen werden. Blautöne deuten hier darauf hin, dass das Sättigungsdefizit sehr gering (0.5 kPa) oder gleich Null ist. Ab etwa Tag 150 stieg das Sättigungsdefizit jedoch an (bis auf 3.5 kPa). Die Maxima konnten zwischen 12 Uhr und 16 Uhr, zur selben Zeit in der sich auch die Maxima der Lufttemperatur befanden, registriert werden. Je wärmer die Luft, desto mehr Feuchtigkeit kann sie aufnehmen, daher auch die Zunahme des VPD mit steigenden Temperaturen. Je größer dieses Defizit wird, desto mehr des im Substrat bzw. in den Pflanzen gebundenen Wassers kann evapo- bzw. transpiriert werden. Die dabei entstehende Verdunstungskälte kühlt das Substrat mit zeitlicher Verzögerung ab. Hinzu kommt, dass die spezifische Wärmekapazität des Wassers deutlich größer als die der Luft ist, wodurch eine Aufwärmung von wasserhaltigem Substrat deutlich verzögert wird. Das Substrat der Dachbegrünung kann demnach in kühlen Jahreszeiten als Temperaturpuffer fungieren, wohingegen es in warmen Jahreszeiten bei ausreichendem Wassergehalt für einen Kühlungseffekt sorgen kann.

Vergleich der Bodentemperaturen zwischen Kontrollen und Monokulturen

Im nächsten Schritt wurden die in den Böden der unbepflanzten Kontrollen gemessenen Temperaturen den in den Monokulturen ermittelten Bodentemperaturen über den Messzeitraum (September 2013-September 2014) gegenübergestellt und für einen Gesamtüberblick als Farbschemata dargestellt (Abbildung 19). Blautöne visualisieren hier tiefere Temperaturen im Substrat der bepflanzten Varianten gegenüber jenen im Substrat der unbepflanzten Kontrollen. Demnach zeigen Gelb- bzw. Orangetöne eine stärkere Aufheizung des Substrats der bepflanzten Schalen im Gegensatz zu den unbepflanzten Kontrollen an.

Um die zeitlichen Unterschiede des Aufheizmusters der fünf Monokulturen detaillierter betrachten zu können, folgen in Abbildung 20 monatliche Einzeldarstellungen der mittleren Temperaturdifferenzen im Tagesverlauf. Darin sind die Bodentemperaturen der Monokulturen als Abweichungen von den Temperaturen der unbewachsenen Kontrollen dargestellt. Negative Abweichungen zeigen an, dass die Böden unter den Pflanzen wärmer als die Kontrollen waren, während positive Abweichungen einen Kühleffekt darstellen.

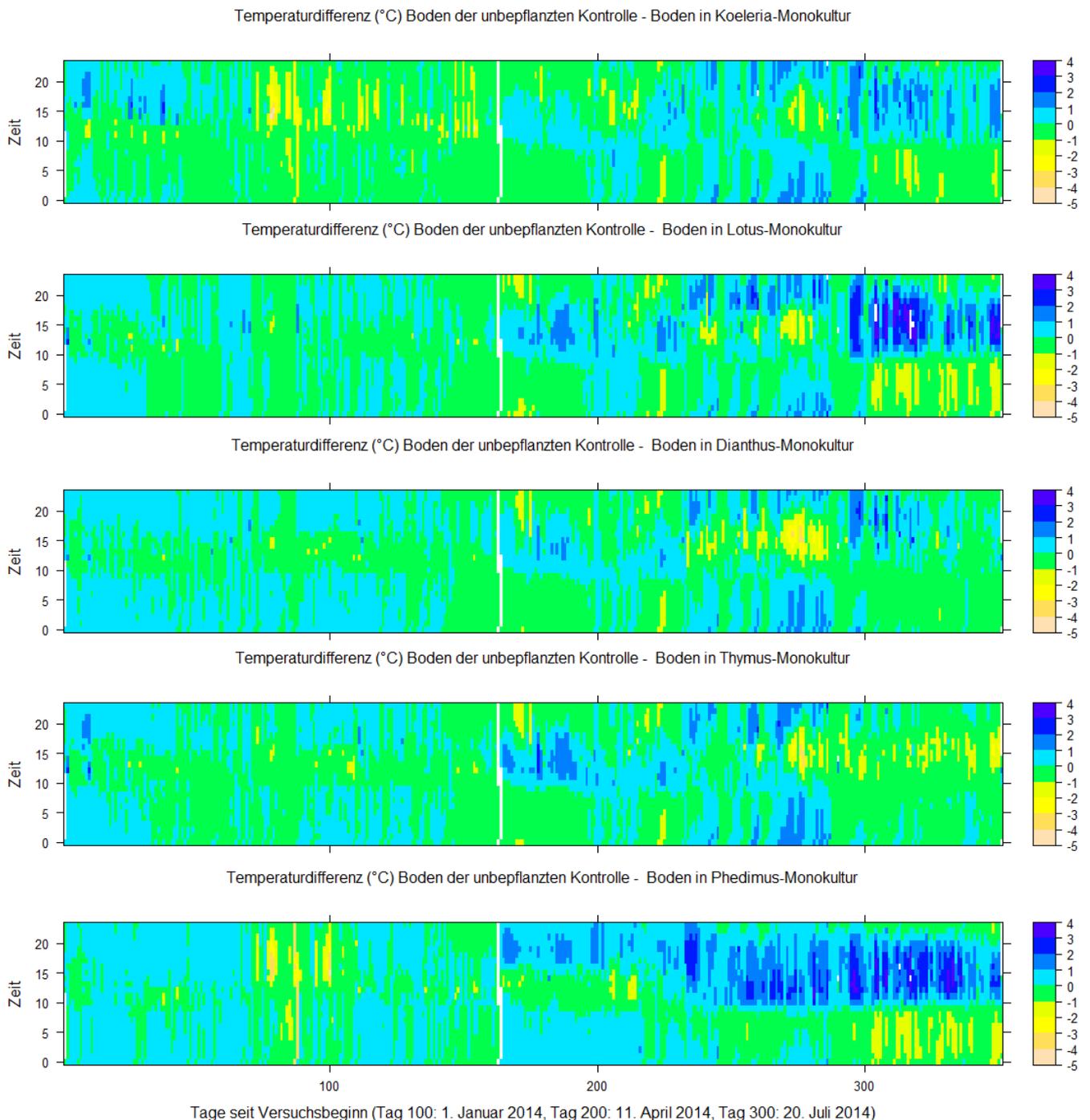


Abbildung 19: Seit dem Versuchsbeginn vom 24. September 2013 bis 9. September 2014 aufgezeichnete Tagesgänge der Temperaturdifferenzen zwischen den Bodentemperaturen der unbewachsenen Kontrollen und der fünf Monokulturen. Tage auf der x-Achse, Stunden auf der y-Achse. Blautöne deuten auf gegenüber den Kontrollen geringere Temperaturen also einen Kühleffekt der Pflanzen hin.

Zum einen zeigt sich, dass sich bis zum Beginn des Frühjahrs (Tag 160, Ende Februar 2014) die Bodentemperaturen der mit *Lotus*, *Dianthus* und *Thymus* bepflanzten Schalen nur unwesentlich von den unbepflanzten Kontrollen unterschieden. Ein anderes Bild ergab sich für das mit *Koeleria glauca* bepflanzte System. In den Wintermonaten war das Substrat unter *Koeleria* in den Mittags- und Abendstunden um bis zu 5°C wärmer als das der Kontrollschalen. Ein ähnliches Muster wiesen auch die mit *Phedimus floriferus* bepflanzten Systeme auf. Auch ihr Substrat war zwischen Tag 70 und Tag 100 zwischen 15 Uhr und 20 Uhr um bis zu 5°C wärmer als das Kontrollsubstrat. Dies könnte auf eine stärkere und schnellere Aufheizung dieser beiden Arten hindeuten und im Falle von *Phedimus* auf seine dunklere Pigmentierung zurückzuführen sein. Etwa ab Tag 160 bis Ende April (Tag 220) zeigte sich aber ein anderes Muster, welches sich außer für *Phedimus* in allen Monokulturen mit nur leichten Abweichungen wiederfand. Das Substrat unter den bepflanzten Ansätzen war nun zwischen 10 Uhr und 15 Uhr deutlich kühler als das Kontrollsubstrat. Dieser Kühlungseffekt erklärt sich zum einen durch die Beschattung des Bodens durch die Pflanzen, sowie durch die Transpirationsskühlung der Pflanzen, welche sich auf die Temperatur des Bodens auswirkt.

Die *Phedimus*-Monokulturen zeigten aber einen den anderen Monokulturen gegenläufigen Tagesgang. Ab den Morgenstunden bis ca. 15 Uhr war das Substrat unter *Phedimus* wärmer als das der Kontrollen, abends und nachts jedoch deutlich kühler. Dies könnte auf das Umschalten in den CAM-Metabolismus in dieser Zeit zurückgehen. *Phedimus floriferus* gehört zur Familie der Crassulaceen (Dickblattgewächse) und betreibt im Gegensatz zu den anderen Arten des Versuchs (C3-Pflanzen) einen fakultativen CAM-Stoffwechsel (*Crassulacean Acid Metabolism*). Mit zunehmender Trockenheit ist es dieser Art möglich, partiell oder ganzheitlich vom C3- auf einen CAM-Metabolismus umzustellen. Für das Umschalten zwischen C3- und CAM-Stoffwechsel sind aber nicht nur Trockenheit, sondern auch Temperaturschwankungen und eine veränderte Lichtzusammensetzung verantwortlich (Grams et al. 1997, Grams & Thiel 2002). Bei Pflanzen mit diesem Stoffwechsel verlaufen die Aufnahme und Fixierung des Kohlenstoffs zeitlich voneinander getrennt. Die Stomata können so während den Tageszeiten mit den höchsten Temperaturen geschlossen gehalten und der Wasserverlust durch Transpiration minimiert werden. So entfiel in dem erwähnten Zeitraum vermutlich bei der *Phedimus*-Monokultur der Kühlungseffekt durch Transpiration auf das Substrat während der warmen Mittagszeit. Erst in den kühleren Abendstunden werden die Stomata zur Aufnahme von CO₂ geöffnet, die Transpiration wird auch über Nacht aufrechterhalten, was sich sowohl im zeitlich versetzten Kühleffekt als auch in den kühleren Bodentemperaturen über Nacht im Vergleich zu den Bodentemperaturen der unbepflanzten Kontrollen zeigt. Es ist zudem möglich, dass die anfangs vorhandene dunkle Pigmentierung des *Phedimus* zu Beginn der Vegetationsperiode für eine zusätzliche Aufheizung über die Mittagsstunden sorgte.

In den Folgemonaten war der Kühleffekt aber nicht mehr nachmittags und abends, sondern während der gesamten hellen Zeit ausgeprägt. Die Böden unter *Phedimus* waren bis zu 2°C kühler als die Böden der unbepflanzten Kontrollen. Außerdem zeigte diese Monokultur einen größeren Kühleffekt als die anderen Arten, der bis in den Spätsommer anhielt. Butler & Orians (2011) machten ähnliche Beobachtungen. In ihren Versuchen auf dem Gründach der Tufts Universität in Medford, Massachusetts reduzierte *Sedum album* die Bodentemperaturen um 5-7°C. Dass *Sedum* zur Abschwächung von Temperaturextremen im Boden geeignet ist, zeigten auch Connop et al. (2014), die Temperaturdifferenzen mittels zwischen, über und unter Gründächern angebrachter Sensoren maßen und diese als prozentuale Temperaturreduktion ausdrückten. Eine solche Darstellung ist jedoch unüblich und es wäre aus Vergleichsgründen besser gewesen, die tatsächlichen Temperaturabweichungen zu benennen.

Während *Thymus* im März 2014 tagsüber noch den vergleichsweise höchsten Kühleffekt hatte und die Bodentemperaturen mittags um 1°C zu senken vermochte, brach die Kühlleistung des Zwergstrauchs im Mai

2014 zusammen. Mit dem Absterben der Pflanzen in den Monokulturen (die die Basis für die Bodentemperaturmessungen bildeten) wurden sogar rund um die Uhr etwas höhere Bodentemperaturen als in den unbewachsenen Kontrollen gemessen. Auch *Dianthus* zeigte einen starken, wenngleich nur kurzfristigen Einbruch in seiner Kühlwirkung in den Monaten Mai bis Juli 2014, welcher vermutlich auf die durch die trocken-heiße Witterung verursachte verringerte Vitalität zurückzuführen ist.

Die Ergebnisse deuten auch Effekte der pflanzlichen Phänologie und des Habitus an. Während *Dianthus*, *Lotus* und auch *Koeleria* ihr Wachstum nach der Frühlingsblüte fast komplett einstellten, gab es im Juli und August 2014 einen erneuten Wachstumsschub, der mit den kühleren und feuchteren Bedingungen einsetzte. Daraufhin war wieder ein deutlicher Kühleffekt zu verzeichnen. Entsprechend wurden in den Substraten unter *Koeleria* und *Dianthus* meist höhere Temperaturen als in den anderen bepflanzten Systemen registriert, was auf deren horstartigen Wuchs und damit eine geringere mögliche Beschattung des Substrats zurückgeht.

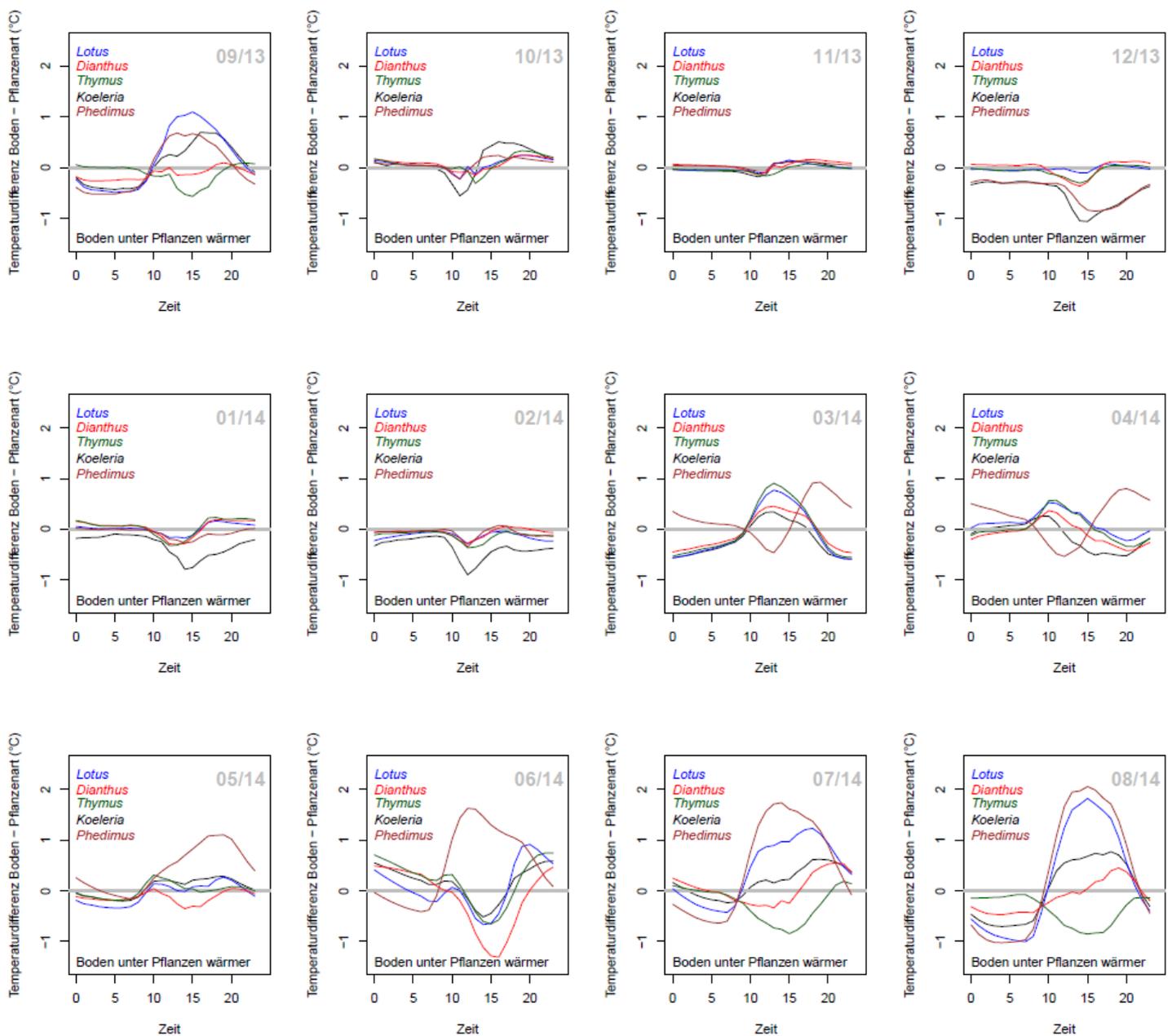


Abbildung 20: Mittlere Temperaturdifferenzen zwischen den Böden der unbewachsenen Kontrollen und den Böden der Monokulturen der fünf Pflanzenarten einzeln dargestellt für die 12 Monate des Versuchs. Datengrundlage 1h-Messwerte mit je zwei Wiederholungen vom 23.09.2013 bis zum 10.09.2014.

4.1.8 THERMOGRAPHIE

Von allen Bepflanzungsvarianten, der Kontrolle sowie von dunklem Lava-Bims Substrat und dem hellem Quarzkies wurden thermographische Aufnahmen angefertigt. An insgesamt sechs Messterminen konnten repräsentative Temperaturmessungen der Mesokosmen bzw. der unbepflanzten Kontrollen und Referenzschalen gemacht werden. Tabelle 5 fasst die während der Messungen registrierten Daten zusammen und enthält Informationen zu den zuvor registrierten Gewichten und den in der Vorwoche evaporierten Mengen Wassers der Kontrollschalen. Dabei stehen hohe Schalengewichte für hohe Bodenwassergehalte und hohe Evaporationswerte für trocken-warme Bedingungen. Diese Informationen wurden herangezogen, um zeitliche Unterschiede der Aufheizung der Mesokosmen bzw. Unterschiede zwischen den Systemen zu erklären.

Tabelle 5. Randbedingungen während der thermographischen Messungen an den sechs Messterminen.

„PAR“ steht für photosynthetisch aktive Strahlung. Die aktuellen Temperaturen beziehen sich auf die Lufttemperaturen während einer Messkampagne und die Temperaturen der Kontrollen auf die mittels IR-Thermographie ermittelten Werte an der Substratoberfläche. „ Δ Temp.“ steht für die aus der Differenz zwischen der Lufttemperatur und der Oberflächentemperatur mittels Infrarot-Kamera ermittelten Aufheizung. Gewicht und Evaporation der Kontrollen beziehen sich auf die vor den Messungen ermittelten Bodenwassergehalte bzw. auf die in der Woche zuvor verdunstete Wassermenge.

Nr.	Datum	Uhrzeit	Bedingungen	PAR mol s ⁻¹ m ⁻²	Temperaturen (°C)		Kontrollschalen (kg)		
					Luft	Kontrollen	Gewicht	Evaporation	Δ Temp.
1	20.05.2012	11:00-13:15	sehr klar	1500-1880	24,8	46,2	31,0	1,88	21,4
2	13.06.2014	11:50-13:30	+/- klar	1400-2100	23,3	40,4	30,7	2,88	17,1
3	18.06.2014	12:30-14:00	+/- klar	1730-2190	21,2	32,3	30,5	2,65	11,1
4	24.06.2014	12:00-13:20	klar	1850-2050	22,3	46,0	30,4	1,16	23,7
5	18.07.2014	11:40-13:15	diesig	1710-1850	30,4	50,3	32,0	2,16	19,9
6	24.07.2014	11:40-13:00	klar	1610-1830	25	33	33,9	-0,27	8,0

Die Ergebnisse der sechs Messtermine sind in den folgenden Abbildungen präsentiert. Abbildung 21 zeigt zunächst eine beispielhafte Übersicht thermografischer Aufnahmen aller Schalen vom 20. Mai 2014. Blautöne repräsentieren kühlere Temperaturen, Rottöne wärmere. Alle Pflanzen lassen sich gut erkennen, da sie kühler sind, also bläulicher erscheinen, als das darunter liegende bzw. sie umgebende gelblich bis rötlich erscheinende Bodensubstrat. Allein anhand der Blau- bzw. Rotfärbung sind so auf den ersten Blick schon grobe Unterschiede zwischen den Ansätzen, besonders zwischen bepflanzten und unbepflanzten Schalen, zu erfassen.

Abbildung 22 bestätigt diesen visuellen ersten Eindruck. Das Temperaturmittel der unbepflanzten Kontrollschalen lag an jedem der sechs Termine deutlich über dem der meisten bepflanzten Systeme. Das dunkle Lava-Bims Substrat hatte noch höhere Temperaturen. Der helle Quarzkies wies allerdings ein den pflanzenbestandenen Systemen ähnliches Temperaturmittel auf. Aufgrund großer Standardabweichungen können für die Temperaturmittel nur Tendenzen zwischen den Systemen aufgezeigt werden. So scheinen insbesondere die Ansätze Nr. 1, 2, 7, 12 und 14 bezüglich des gemessenen Temperaturmittels eine höhere Kühlleistung zu haben als die anderen Ansätze.

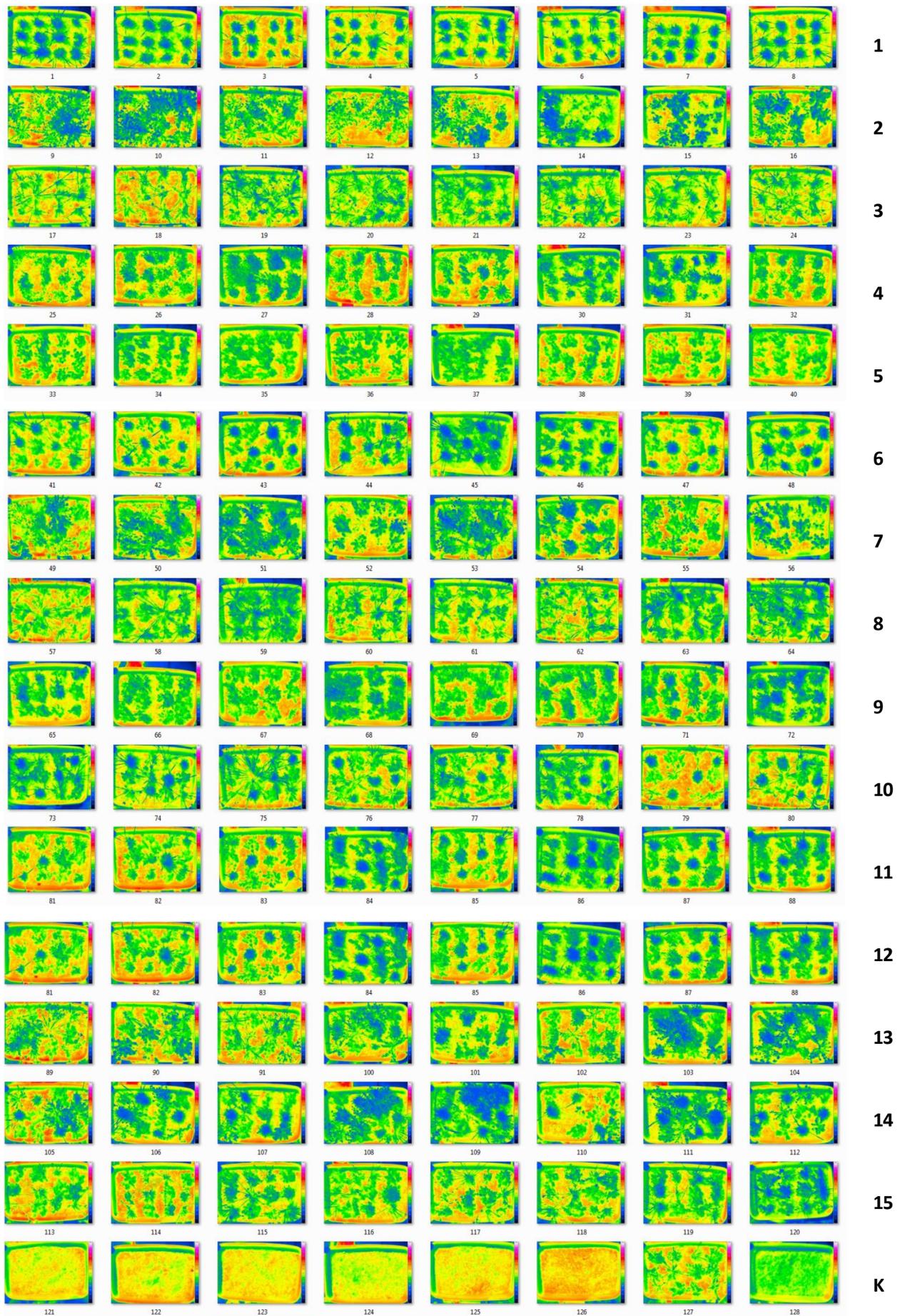


Abbildung 21: Übersicht der thermografischen Aufnahmen aller Schalen vom 20. Mai 2014. Die Nummern bezeichnen den Systemansatz, K = Kontrollschalen (vgl. Tabelle 3). Erläuterungen im Text.

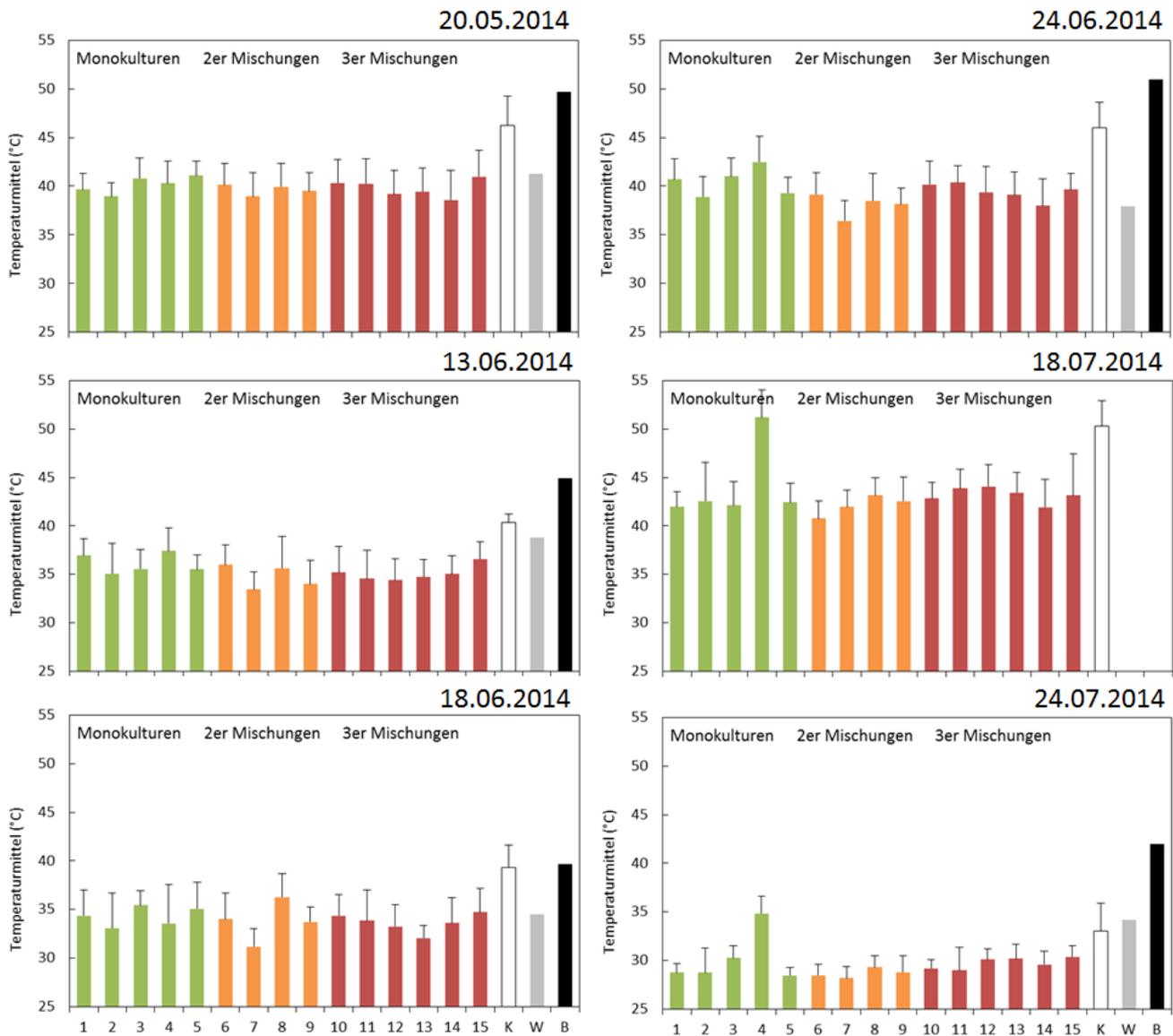


Abbildung 22: An sechs Terminen mittels IR-Thermographie gemessene mittlere Oberflächentemperaturen (\pm Standardabweichungen, $N=8$) der 15 Pflanzansätze (Varianten bzw. Nummern vgl. Tabelle 3), der Kontrollen (K), sowie des als Referenzmaterialien verwendeten hellen Quarzkieses (W) und des dunklen Lava-Bimses (B). Letzte wurden am 18.07.2014 nicht betrachtet.

In der Londoner Untersuchung (Connop et al. 2014) erwies sich die biodiverse Mischung besser als die Standard-Sedum-Ausführung geeignet, die Lufttemperatur durch Transpirationskühlung zu reduzieren. Dabei wurden jedoch nur die Daten der heißesten Tage in 2010 und 2011 präsentiert, so dass keine Aussagen zur jahreszeitlichen Entwicklung des Kühleffekts gemacht werden können. Die Temperaturmessungen wurden 5 cm über dem Bestand gemacht, was methodisch als problematisch gelten muss, da sich die Thermo-elemente zu stark aufheizen können. Als Referenz wurden Leerschalen benutzt, jedoch wäre die Einbeziehung von mit Substrat befüllten, aber ohne Pflanzen bestandenen Kontrollen und die Nutzung eines weiter vom Bestand entfernten Infrarotmesssystems sinnvoller gewesen.

Setzt man die Temperaturmittel der 15 Ansätze zusätzlich der unbepflanzten Kontrollen ins Verhältnis zur prozentualen Deckung der Systeme zum jeweiligen der sechs Termine (Abb. 23), zeigt sich eine starke Korrelation zwischen diesen Größen ($R^2 > 0,61$). Je höher die Deckung, desto geringer das gemessene Temperaturmittel. Eine höhere Pflanzendeckung trägt demnach maßgeblich zu einer höheren Kühlwirkung bei. Eine hohe Deckung gekoppelt mit niedrigeren Temperaturmitteln war durchweg bei den Ansätzen Nr. 7, 9, 13 und

14 zu beobachten. Die Monokulturen von *Koeleria* (1) und *Dianthus* (3), sowie 2er- und 3er-Mischungen mit diesen Arten (8, 10) wiesen hingegen geringere Deckungsraten und im Falle von *Dianthus* höhere Temperaturmittel auf.

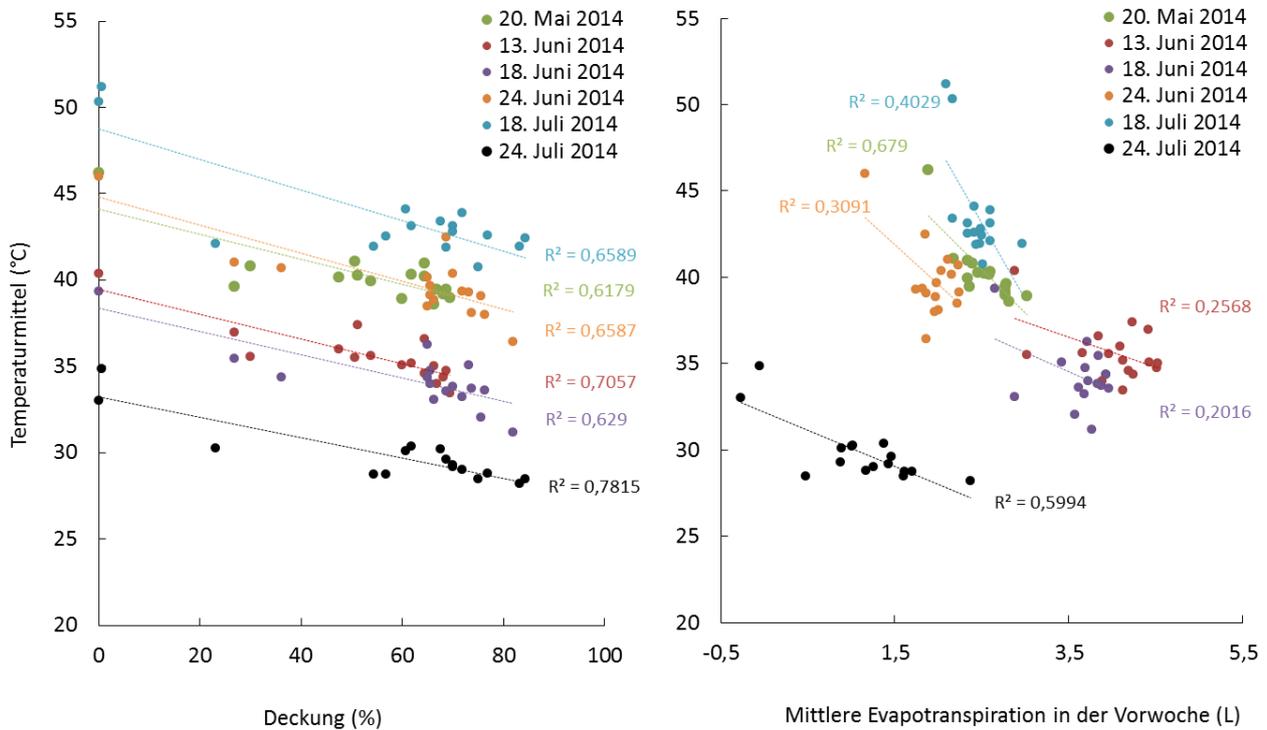


Abbildung 23: Temperaturmittel (°C) der 15 Pflanzansätze (Varianten bzw. Nummern vgl. Tabelle 3) und der Kontrollen in Abhängigkeit von der Deckung (%) und der mittleren Evapotranspiration in der Vorwoche (L) an den sechs untersuchten Terminen (siehe Legende).

Zum Nachweis der Transpirationskühlung sollten die Ergebnisse der thermometrischen Analysen auch mit der Menge des evapotranspirierten Wassers verknüpft werden. Abbildung 23 (links) zeigt den erwarteten Zusammenhang zwischen beiden Parametern. Systeme mit höheren Transpirationsraten wiesen die geringsten mittleren Temperaturen auf. Ein optimales System sollte jedoch auch bei kleiner Evapotranspirationsrate ein geringes Temperaturmittel aufweisen. Diesbezüglich erwiesen sich besonders die Ansätze Nr. 5, 7, 9, 12, 13 und 14 als geeignet.

4.2 GEWÄCHSHAUSEXPERIMENTE MIT AUSGEWÄHLTEN PFLANZENARTEN

Abbildung 24 gibt Aufschluss über die während des Versuchs im Gewächshaus registrierten Temperaturen sowie über den mittleren Tagesgang der Temperaturen. Während des einwöchigen Austrocknungsversuchs vom 24.02. bis 03.03.2014 lagen die mittäglichen Temperaturmaxima zwischen 26 und 33°C.

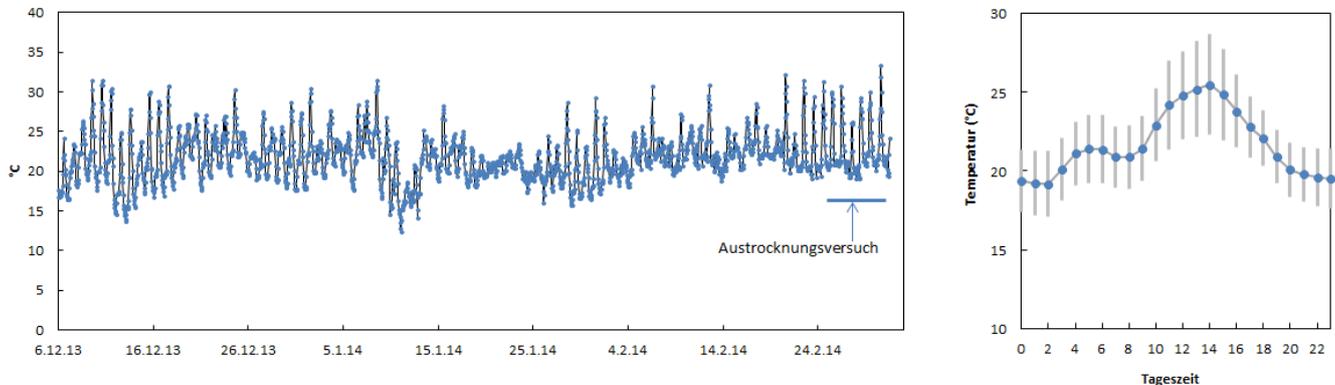


Abbildung 24: Temperaturverlauf (Stundenwerte) während des Versuchs (links) und mittlere Tagesgänge (rechts) während des Gewächshausversuchs.

4.2.1 KEIMTESTS UND BESTIMMUNG DER RELATIVEN WACHSTUMSRATEN

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse der Keimtests mit dem Samenmaterial der 50 ausgewählten Arten. Von den 50 Arten keimten 47 (94%), jedoch schwankten die Keimraten zwischen 1% (*Campanula persicifolia*) und 72.5% (*Medicago lupulina*). Während einige Arten unter den Gewächshausbedingungen (16 h Licht, 15°C nachts, 20°C tags) z.B. die Asteraceae *Anthemis tinctoria* und *Achillea millefolium* bereits nach 5 Tagen aufliefen, benötigten andere Arten z.B. die Crassulaceae nahezu zwei Wochen bis zum Einsetzen der Keimung. Zur Bestimmung der relativen Wachstumsraten (RWR) wurden am Tag 7 und am Tag 21 nach Keimbeginn zufällig ausgewählte Keimlinge einer Art geerntet. Für diese Untersuchung standen genügend Keimlinge von insgesamt 34 Arten bereit. Während in der Etablierungsphase die Leguminose *Onobrychis viciifolia* die meiste und Kräuter wie *Hieracium pilosella* und *Potentilla recta* die geringsten Trockenmassen aufwiesen, hatten die *Sedum*-Arten trotz ihrer geringen Trockengewichte recht hohe relative Wachstumsraten.

Dies deutet darauf hin, dass sich diese Arten für die Etablierung aus Samen unter Umständen besser eignen als viele der krautigen Arten. Hierbei muss aber sichergestellt werden, dass die eingesetzten Arten auch hohe Keimraten aufweisen. Für die Anlage von Gründächern, in denen eine gewünschte Artkombination beabsichtigt ist, müssen daher zuvor Keimtests erfolgen.

Tabelle 6: Übersicht der im AP2 benutzten Pflanzenarten, deren Familie und Herkunft sowie die Ergebnisse der Keimversuche, die relativen Wachstumsraten und die in den Austrocknungsversuchen ermittelten Trockenmassen bzw. Blattflächen.

Nr	Artname (wissenschaftlich)	Familie	Herkunft ^a	Tausendkorn- masse (g)	Keimdauer (d)	Keimrate (%)	Gewicht am Tag 21 (g TM)	RWR ^(d 7-21) (g g ⁻¹ d ⁻¹)	Fläche (cm ²)	Spross (g TM)	Wurzel (g TM)	SLA ^b (cm ² g ⁻¹)	SRR ^c
1	<i>Achillea millefolia</i>	Asteraceae	A	0,15	5	16,5	0,0010	0,1308	214,1	0,92	0,37	230,8	2,5
2	<i>Allium schoenoprasum</i>	Liliaceae	A	1,30	6	24	0,0006	0,0299	22,7	0,13	0,07	174,4	1,8
3	<i>Anthemis tinctoria</i>	Asteraceae	A	0,40	5	23,5	0,0011	0,1071	216,8	0,97	0,22	228,3	4,4
4	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Poaceae	A	0,66	6	28,5	0,0005	0,0428	206,0	0,66	0,39	314,3	1,7
5	<i>Aquilegia vulgaris</i>	Ranunculaceae	A	1,69	17	0,5							
6	<i>Aster linosyris</i>	Asteraceae	R	1,43		0							
7	<i>Campanula glomerata</i>	Campanulaceae	A	0,13	14	3	0,0001	0,0000					
8	<i>Campanula persicifolia</i>	Campanulaceae	A	0,05	17	1	0,0001	0,0000					
9	<i>Campanula rapunculoides</i>	Campanulaceae	A	0,21	12	9	0,0003	0,0785	93,3	0,29	0,21	331,8	1,4
10	<i>Campanula rotundifolia</i>	Campanulaceae	A	0,06	12	10,5	0,0001	0,0290	46,9	0,13	0,03	380,5	4,9
11	<i>Centaurea scabiosa</i>	Asteraceae	A	5,26	5	22,5	0,0050	0,2508	127,9	0,69	0,26	187,4	2,7
12	<i>Clinopodium vulgare</i>	Lamiaceae	A	0,42	6	3	0,0011						
13	<i>Crysanthemum leucanthemum</i>	Asteraceae	A	0,29	7	15	0,0005	0,0495	144,7	0,89	0,26	164,4	3,5
14	<i>Dianthus carthusianorum</i>	Caryophyllaceae	A	0,60	6	15	0,0009	0,0173	101,4	0,51	0,14	195,7	4,1
15	<i>Dianthus deltoides</i>	Caryophyllaceae	A	0,18	14	3	0,0002	0,0495	50,8	0,33	0,07	153,9	5,1
16	<i>Euphorbia cyparissias</i>	Euphorbiaceae	A	2,29	9	5,5	0,0043	0,0854	39,9	0,23	0,12	175,2	2,0
17	<i>Festuca ovina</i>	Poaceae	A	0,88	6	46,5	0,0005	0,0561	30,8	0,14	0,09	235,3	1,5
18	<i>Festuca rubra</i>	Poaceae	A	1,06	6	67	0,0009	0,0659	88,6	0,44	0,25	201,5	1,8
19	<i>Fragaria vesca</i>	Rosaceae	A	0,31	10	8,5	0,0005	0,0990	108,2	0,35	0,04	322,8	8,5
20	<i>Galium verum</i>	Rubiaceae	A	0,33	9	23,5	0,0007	0,0733	164,3	0,77	0,21	213,9	3,8
21	<i>Hieracium murorum</i>	Asteraceae	R	0,46	7	4,5	0,0007	0,0110					
22	<i>Hieracium pilosella</i>	Asteraceae	A	0,11	7	2,5	0,0001		163,6	0,61	0,17	290,0	3,7
23	<i>Hypericum perforatum</i>	Hypericaceae	A	0,12		0	0,0004						
24	<i>Knautia arvensis</i>	Dipsacaceae	A	5,13	11	5,5	0,0025		149,5	0,69	0,32	217,1	2,2
25	<i>Koeleria glauca</i>	Poaceae	A	0,17	9	28			38,7	0,13	0,03	322,8	7,9
26	<i>Linum perenne</i>	Linaceae	A	1,75	7	17	0,0012	0,0339	17,5	0,13	0,05	132,0	2,9
27	<i>Lotus corniculatus</i>	Fabaceae	A	1,41	5	38,5	0,0017	0,0233	89,9	0,73	0,13	124,4	5,8
28	<i>Medicago lupulina</i>	Fabaceae	A	1,75	3	72,5	0,0026	0,0615	151,0	0,77	0,26	198,5	3,0
29	<i>Onobrychis vicifolia</i>	Fabaceae	A	20,46	5	57	0,0082	0,0146	83,3	0,43	0,25	193,2	1,8
30	<i>Origanum vulgare</i>	Lamiaceae	A	0,06	11	3,5							
31	<i>Papaver dubium</i>	Papaveraceae	A	0,11	9	0,5							
32	<i>Papaver rhoeas</i>	Papaveraceae	A	0,07	5	22	0,0007	0,0620	247,9	0,94	0,21	263,2	4,6
33	<i>Petrorhagia saxifraga</i>	Caryophyllaceae	A	0,13	5	35,5	0,0005		69,2	0,43	0,08	160,1	5,9
34	<i>Plantago media</i>	Plantaginaceae	A	0,46	6	9,5	0,0008	0,0385	138,6	0,81	0,26	177,4	3,6
35	<i>Poa pratensis</i>	Poaceae	A	0,23	9	27	0,0002	0,0205	60,9	0,27	0,21	225,3	1,3
36	<i>Potentilla recta</i>	Rosaceae	A	0,20	9	4,5	0,0001	0,0000	131,5	0,71	0,29	186,7	2,4
37	<i>Prunella grandiflora</i>	Lamiaceae	A	1,00	7	18	0,0011	0,0307					
38	<i>Prunella vulgaris</i>	Lamiaceae	A	0,89	9	3,5	0,0020	0,0570					
39	<i>Rumex acetosella</i>	Polygonaceae	A	0,51	5	4	0,0013						
40	<i>Salvia pratensis</i>	Lamiaceae	A	1,62	5	3	0,0047	0,0345	290,0	1,16	0,33	250,1	3,5
41	<i>Sanguisorba minor</i>	Rosaceae	A	5,31	10	6,5	0,0021	0,0208	130,2	0,57	0,14	233,6	4,0
42	<i>Saponaria ocyroides</i>	Caryophyllaceae	A	1,93	9	59	0,0013	0,0574	118,3	0,84	0,09	140,4	9,2
43	<i>Sedum acre</i>	Crassulaceae	A	0,04	9	5,5	0,0038	0,1318	69,5	0,33	0,01	213,0	32,7
44	<i>Sedum album</i>	Crassulaceae	A	0,02	9	4	0,0024	0,2270	33,5	0,14	0,01	245,8	13,7
45	<i>Sedum sexangulare</i>	Crassulaceae	R	0,03	12	1,5	0,0027	0,2354	14,5	0,10	0,02	153,6	7,0
46	<i>Sedum telephium</i>	Crassulaceae	A	0,05	12	1,5	0,0064	0,2971					
47	<i>Silene vulgaris</i>	Caryophyllaceae	A	0,65	6	34,5	0,0009	0,0546	282,4	1,51	0,21	188,3	7,7
48	<i>Teucrium scorodonia</i>	Lamiaceae	A	0,76		0							
49	<i>Thymus pulegioides</i>	Lamiaceae	A	0,15	7	8	0,0001						
50	<i>Thymus serpyllum</i>	Lamiaceae	A	0,14	9	15	0,0003	0,0701					

^a A= Appels Wilde, R=Rieger Samen

^b SLA= specific leaf area, spezifische Blattfläche

^c SRR= shootroot ratio, Spross-zu-Wurzel-Verhältnis

4.2.2 AUSTROCKNUNGSVERSUCHE

Insgesamt standen für die Austrocknungsversuche, welche 80 Tage nach der Saat begonnen wurden, 34 der am 6.12.2013 ausgesäten 50 Arten zur Verfügung. Die Arten waren zu diesem Zeitpunkt unterschiedlich weit entwickelt. Während z.B. *Papaver rhoeas* und *Plantago media* schon weit entwickelt waren, hatten die Pflanzen von z.B. *Linum perenne* und *Allium schoenoprasum* bislang nur wenig Biomasse gebildet. Trotz ihrer unterschiedlichen Größe wurden die Pflanzen einem standardisierten Austrocknungsversuch unterzogen, in dem die Transpirationsverluste und die Blatttemperaturen betrachtet werden sollten. Abbildung 25 gibt Überblick über die artspezifischen kumulativen Wasserverluste über die Bodenevaporation (Kontrolle) und die Evapotranspiration.

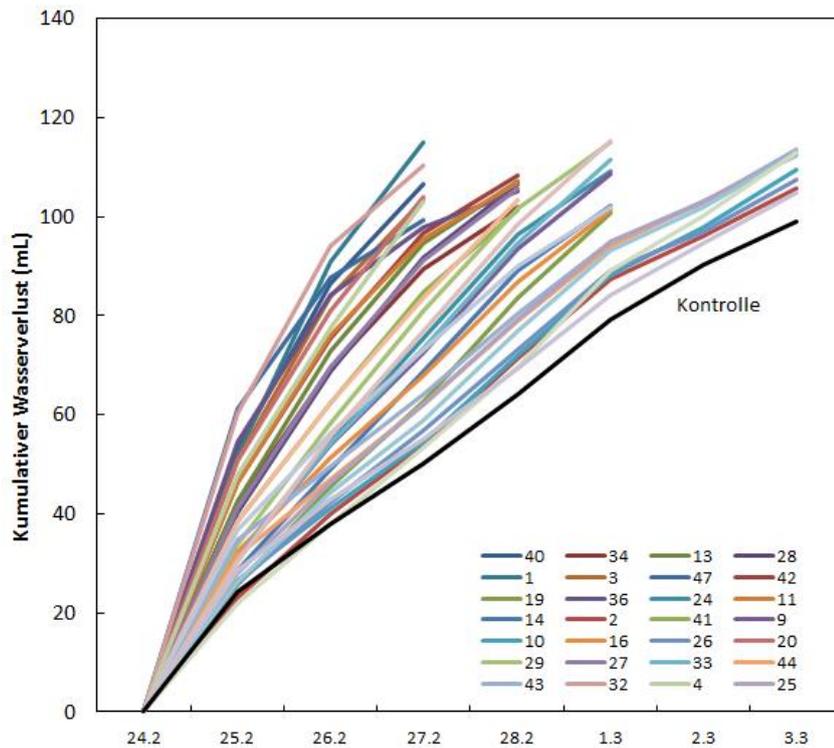


Abbildung 25: Kumulative Wasserverluste über sieben Tage nach Beginn des Austrocknungsversuchs bei 34 Pflanzenarten (vgl. Nr. in Tabelle 6) und der unbepflanzten Kontrolle. Das Ende jeder Linie markiert den Zeitpunkt, an dem eine Evapotranspiration von mehr als 100 mL Wasser erfolgt war.

Abbildung 26 zeigt die Abfolge der Ernten in Abhängigkeit von der Pflanzengröße. Während die großen Pflanzen (hohe Sprossmasse und große Blattfläche) bereits nach drei Tagen 100 mL Wasser verloren bzw. transpiriert hatten und geerntet wurden, war dies bei den kleinsten Pflanzen erst nach sieben Tagen der Fall.

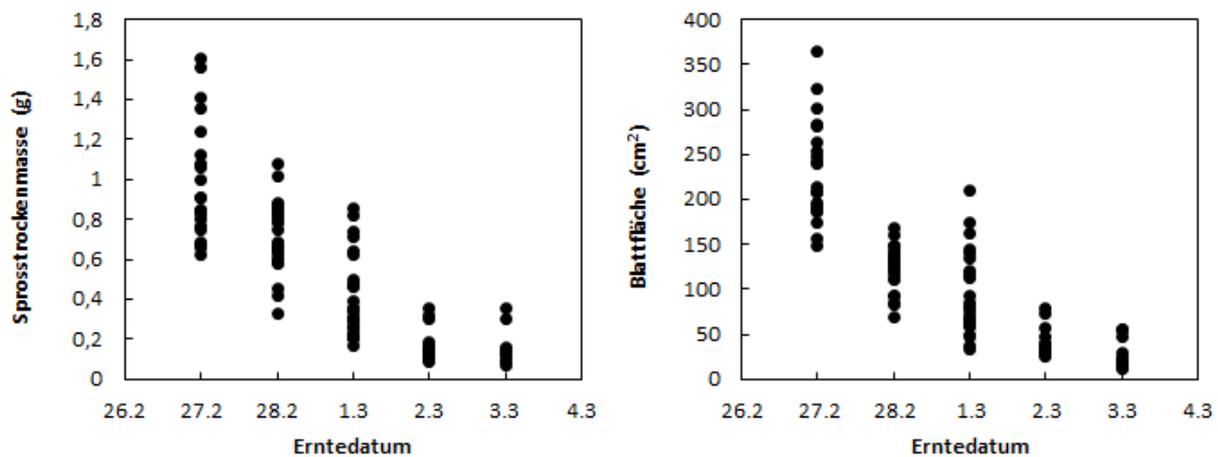


Abbildung 26: Abhängigkeit des Erntedatums von der im Versuch gebildeten Pflanzensprossmasse (links) und der Blattfläche (rechts).

Die nach drei Tagen beobachteten Wasserverluste bzw. Transpirationsmengen standen erwartungsgemäß in einem Verhältnis zur vorhandenen Blattfläche bzw. Sprossmasse (Abb. 27). Diese Beziehung war aber nicht linear, was darauf schließen lässt, dass es bei Pflanzen mit größerer Blattfläche zu gewissen Schattierungseffekten kam, so dass die Verdunstung über die Boden- und Blattfläche insgesamt etwas verringert wurde. Die registrierten Wasserverluste standen aber in keinem Verhältnis zu den spezifischen Blattflächen und Spross-

Wurzelverhältnissen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Blattdichte und die relativen Massenanteile der Wurzel im Versuch noch keinen Einfluss auf den Wasserdurchsatz hatten. Über längere Zeiträume betrachtet, wird aber die Wurzelmasse den Wasserhaushalt einer Pflanze beeinflussen und auch die Blattdichte bzw. das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis von Pflanzen wird sich auf die Wassernutzung bzw. -einsparung auswirken. Der nach drei Tagen registrierte kumulative Wasserverlust wurde auch in Relation zur Blattfläche gesetzt, um den Wasserlust auf eine einheitliche Flächengröße zu beziehen. Die pro Quadratzentimeter in drei Tagen umgesetzte Wassermenge (Daten nicht gezeigt) zeigte artspezifische Unterschiede und stand in einer schwach negativen Beziehung (R^2 0.31) zur Sprossstrockenmasse. Offensichtlich war bei den größeren Pflanzen das Oberfläche-zu-Volumen Verhältnis günstiger als bei den kleinen Pflanzen, wodurch weniger Wasser über die Spaltöffnungen verdunstet wurde. Die pro Zentimeter transpirierte Menge zeigte demgegenüber keine Beziehung zur spezifischen Blattfläche.

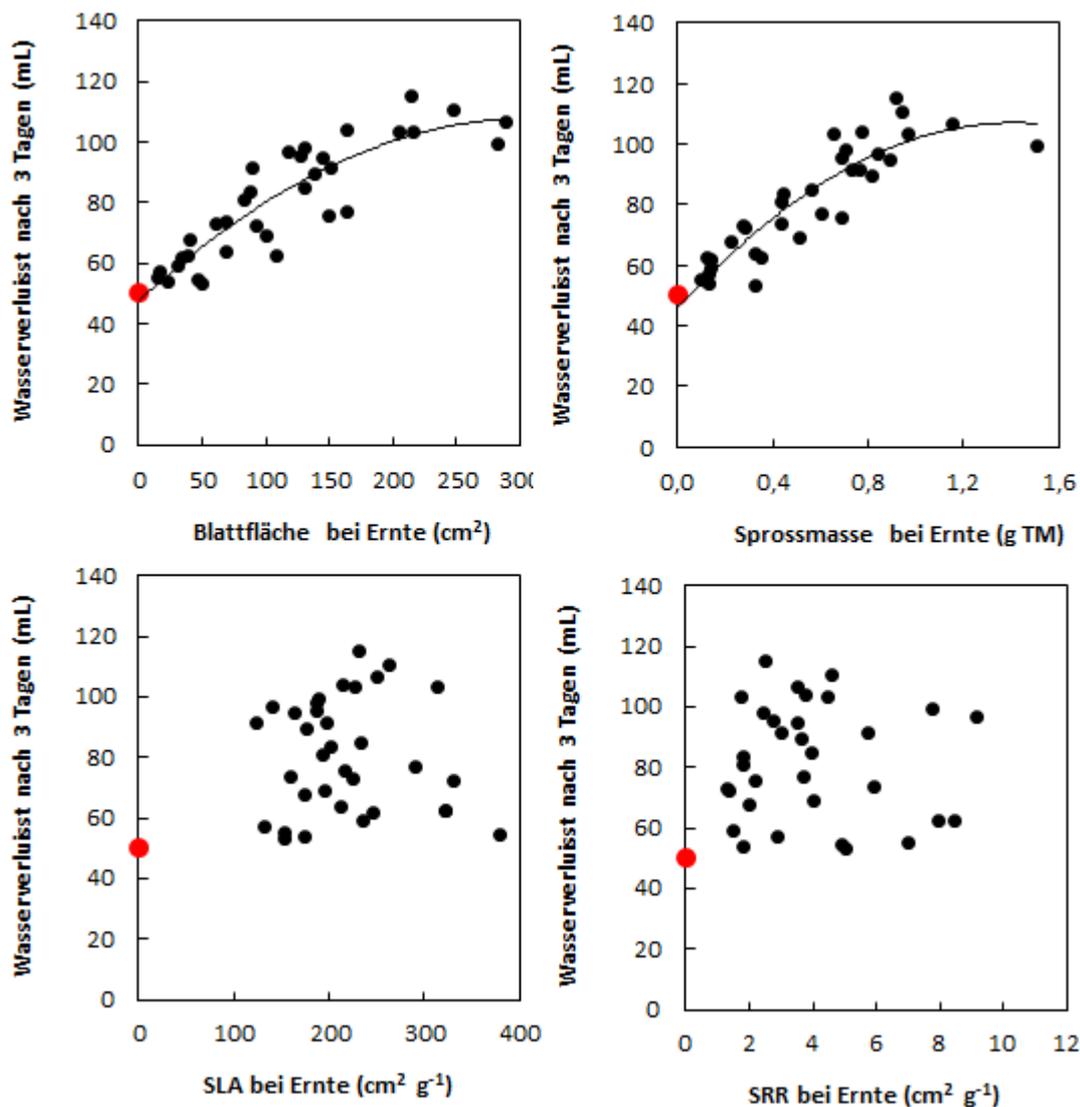


Abbildung 27: Beziehung der Blattfläche, Sprossmasse, spezifischen Blattfläche (SLA) und der Spross:Wurzelverhältnisse (SRR) zu den nach drei Tagen bestimmten kumulativen Wasserverlusten. Rote Punkte repräsentieren die unbepflanzten Kontrollen.

4.2.3 THERMOGRAPHIE

Beispielfotos, d.h. Realbilder und IR-Bilder der verschiedenen Arten sind den Abbildungen A2 und A3 im Anhang zu entnehmen. Bei der Betrachtung der artspezifischen Unterschiede der Blattoberflächentemperaturen ergab sich folgendes Bild. Im Mittel war die unbepflanzte Kontrolle kühler als die Pflanzenblätter, was durch die höheren absoluten Wassergehalte und das geringe Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis des Bodens im Vergleich zu den mit der Luft gekoppelten Blättern begründet sein dürfte. Dennoch waren die Blätter aller Arten im Mittel kühler als die sie umgebende Luft, was auf die transpirationsbedingte Kühlung zurückgehen dürfte. Dieser Kühlungseffekt (canopy temperature depression CTD) war aber bei höheren Temperaturen stärker ausgeprägt als bei geringeren Umgebungstemperaturen (Abbildung 28), was auf das höhere Dampfdruckdefizit (VPD) und die dann stärkere Transpiration zurückzuführen sein dürfte.

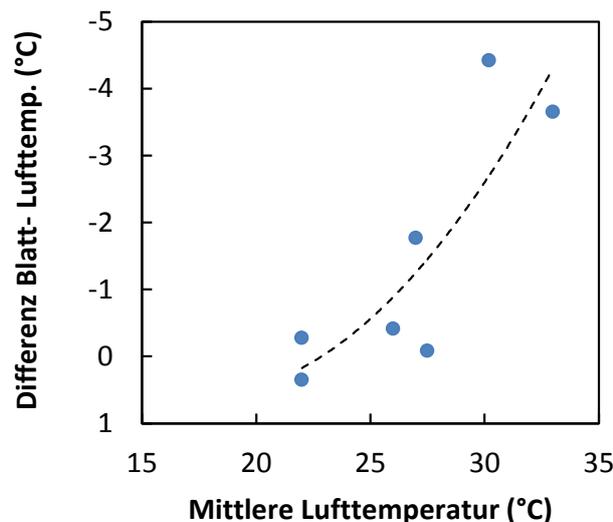


Abbildung 28: Abhängigkeit des Kühleffekts von der Umgebungstemperatur. Dargestellt ist die mittlere Differenz der Blattoberflächentemperaturen von den Lufttemperaturen (y-Achse).

Abbildung 29 zeigt die Rangfolgen der mittags an drei Tagen gemessenen Blattoberflächentemperaturen im Vergleich zu den Bodentemperaturen. Während die drei Pflanzenarten *K. arvensis*, *O. viciifolia* und *C. rotundifolia* kühler als der Boden waren, hatten alle Grasarten bis auf *P. pratensis* deutlich höhere Blattoberflächentemperaturen. Zudem wiesen zwei der drei überprüften Leguminosen, vergleichsweise niedrige Blattoberflächentemperaturen auf.

Die im Mittel geringeren Blattoberflächentemperaturen bei den Rosetten bildenden Arten im Vergleich zu den aufrecht stehenden, schmalblättrigen gehen zum Teil auf Unterschiede in der Pflanzenhöhe zurück. Während die planaren, bodendeckenden Rosettenblätter z.B. der *C. rotundifolia* unterseitig durch den Boden gekühlt wurden, hatten die vertikal positionierten Blätter auf beiden Seiten Anschluss an die Atmosphäre, so dass sich solche Blätter stärker erhitzen konnten und der Wärmeaustausch bzw. die Transpiration stärker ausgeprägt war.

Bei den sehr schmalen Blättern muss aber berücksichtigt werden, dass sich gewisse Messfehler wegen einer unzureichenden geometrischen Auflösung des thermometrischen Verfahrens ergeben haben könnten, die zu einer leichten Überschätzung der Blattoberflächentemperaturen geführt haben können. Allgemein ist darauf hinzuweisen, dass auch eng am Boden anliegende Rosettenpflanzen im Verlaufe der Vegetationsperiode in das Stadium des Schossens gelangen und einen oder mehrere hochragende Triebe bilden, die sich stärker aufheizen können als die bodennahen Rosetten. Nach dem Blühen ziehen Pflanzen in der Regel Ressourcen zurück in die Überwinterungsorgane, was mit der Seneszenz der Blätter einhergeht. Alternde Blätter weisen daher

andere Reflexions- und Absorptionseigenschaften und damit Temperaturreaktionen auf als junge, physiologische voll aktive und noch stark transpirierende Blätter. Im durchgeführten Versuch wurden solche durch das unterschiedliche Alter bedingte Effekte jedoch nicht betrachtet.

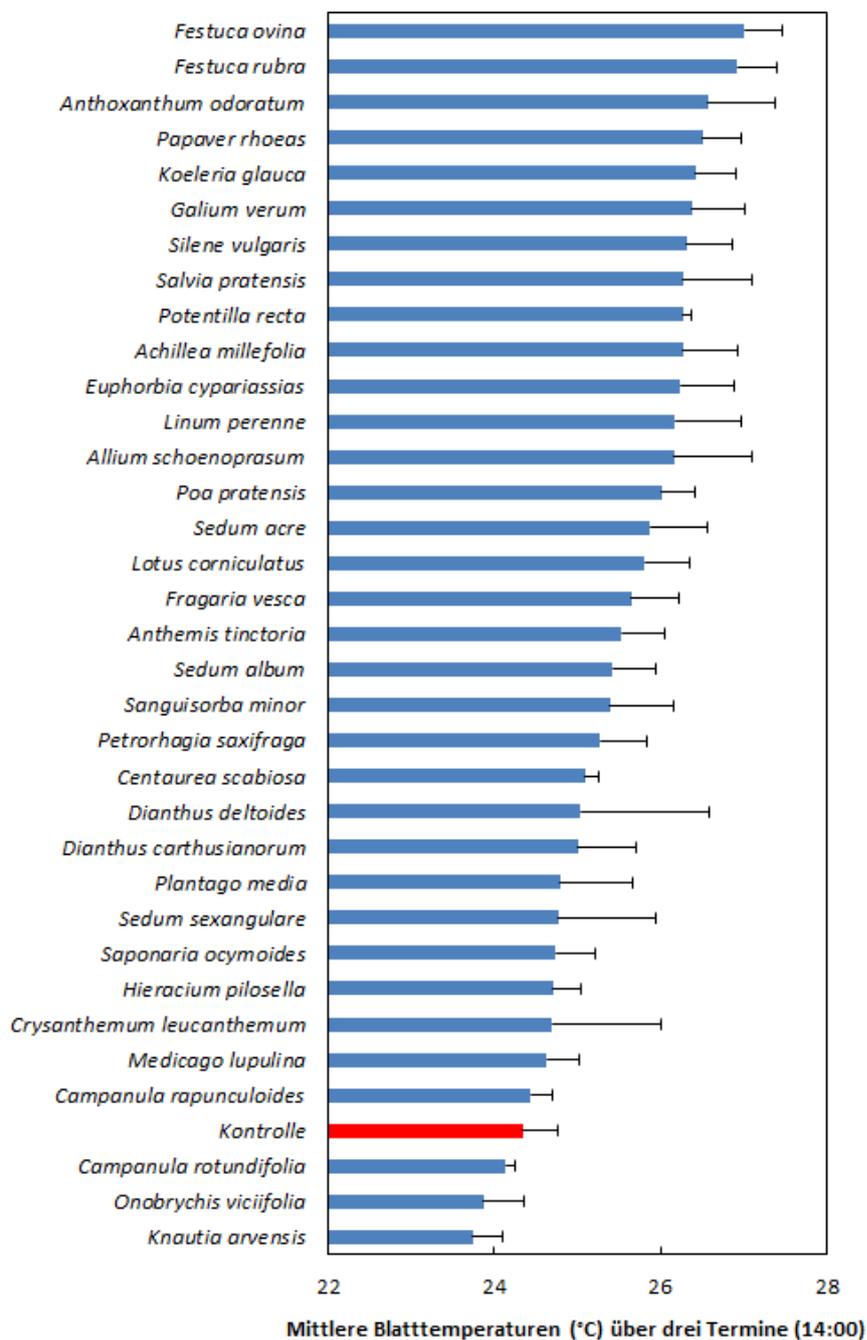


Abbildung 29: Mittlere Blattoberflächentemperaturen (Rangfolgen) von 34 Pflanzenarten und einer Kontrolle (roter Balken) an drei Tagen (jeweils 14:00, vgl. T1; T3 und T5 in Tabelle 4), an denen Daten aller Pflanzen erhoben wurden.

Bei der (Evapo-)transpiration erfolgt ein Übergang des Wassers von der flüssigen zur gasförmigen Phase und ein Aufbrechen von H₂O-Wasserstoffbrücken, so dass dem System (der direkten Umgebung der Pflanze) Energie entzogen wird (Maes & Steppe 2012). Evaporation von Wasser führt daher zur Abkühlung der Blattoberfläche aufgrund der höheren Strahlungsmenge, die durch den latenten Wärmefluss abgeführt wird.

Um dies näher zu betrachten, wurde die Menge des verdampften Wassers in Beziehung zu den mittleren Blatttemperaturen gesetzt. Wegen der nach und nach erfolgenden Pflanzenernten reduzierte sich die dabei betrachtete Zahl von Pflanzenarten von 34 am Tag 3 auf 27 Arten am Tag 4 und auf 18 Arten am Tag 6. Abbildung 30 zeigt, dass es an allen drei Terminen eine leicht positive Beziehung zwischen den Blatttemperaturen und den vorangegangenen Wasserverlusten gab. Dies deutet darauf hin, dass sich Blätter, die zuvor viel Wasser abgegeben hatten, nachfolgend stärker aufheizten. Die Ergebnisse des Versuchs bestätigen somit auch, dass die Kühlwirkung von Pflanzen auf ihre Umwelt begrenzt ist, da sich nach dem Durchsatz von Wasser über die Transpiration und der Abfuhr von Wärme schon nach kurzer Zeit eine Aufheizung von Pflanzenblättern ergibt und der Kühleffekt umgekehrt werden kann.

Idealerweise sollte eine Gründachpflanze eine möglichst lang andauernde Kühlleistung entfalten und das Wasser nur langsam an die sie umgebende Luft abgeben. Die Kombination von Rosettenpflanzen, die den Boden beschatten und Grasartigen, die aufgrund ihrer höheren atmosphärischen Kopplung und geringeren Grenzschichtwiderstände einen schnelleren Wärmeaustausch ermöglichen, könnte daher ein sinnvoller Ansatz bei dem Design optimaler extensiver Dachbegrünungssysteme sein.

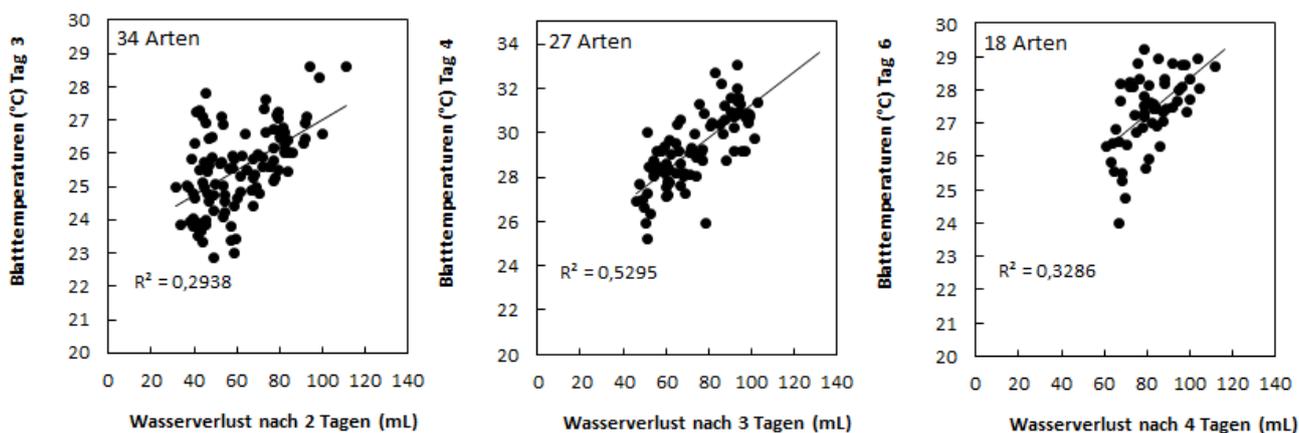


Abbildung 30: Beziehungen zwischen den Blatttemperaturen und den Wasserverlusten an drei Terminen. Während am ersten Termin noch alle 34 Pflanzenarten im Versuch vorhanden waren, reduzierte sich die Anzahl der betrachteten Pflanzenarten aufgrund der konsekutiven Ernten auf 18. Pro Art wurden drei Wiederholungen benutzt.

4.2.4 NIR-SPEKTREN

Während Möglichkeiten zur Vorhersage ökophysiologischer (z.B. Gaswechsel und Photosynthese) und chemischer Parameter (z.B. Stickstoffkonzentration) mittels NIR-Spektren intakter (feuchter) Blätter erstmals durch Serbin et al. (2011) dargestellt wurden, gab es bislang noch keine Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen NIR-Spektren und dem thermischen Verhalten von Blättern.

Der Zusammenhang zwischen optischen Eigenschaften von Blättern bzw. Nadeln und strukturellen Eigenschaften (z.B. spezifische Blattfläche, SLA und equivalent water thickness, EWT) und der chemischen Beschaffenheit (z.B. Stickstoff- und Chlorophyllgehalte) wurde durch Wicklein et al. (2012) und Lukeš (2013) betrachtet. Dabei zeigte sich auf der Blattebene, dass die Albedo im NIR-Bereich negativ mit den Stickstoffkonzentrationen korrelierte. Blätter mit einer geringen Stickstoffkonzentration sind zumeist dicker und führen trotz des geringeren Oberfläche-zu-Volumen Verhältnisses zu einer höheren Reflektivität aufgrund der dichter gelagerten Zellen und der Mehrfachreflexion von Photonen. Zudem wirkt sich das vermehrte Vorhandensein von Wachsen und Trichomen sowie von panaschierten Blattbereichen bei gestressten Pflanzen positiv auf die Reflektivität aus. Auf der Bestandesebene wird die Reflektivität aber von der Blattposition und -stellung überprägt und es zeigte sich entgegen der Untersuchungen auf Blattebene in Fernerkundungsstudien eine höhere Reflektivität der besser mit Nährstoffen versorgten Bestände.

Obwohl Aussagen zur Ökophysiologie von Pflanzen mittels NIR Spektren auf Bestandes- und Blattebene nur schwer zu treffen sind (vgl. auch den Übersichtsartikel über nicht zur Photosynthese genutzte Strahlung von Ollinger 2012), bilden NIR-Spektren trockener und gemahlener Pflanzenproben die chemische Zusammensetzung des Materials gut ab. Es kann zudem davon ausgegangen werden, dass die stoffliche Zusammensetzung des Materials (N, C, C:N, Lignin etc.) großen Einfluss auf die Absorption von Strahlung und die Aufheizbarkeit von Oberflächen hat. Hierbei muss aber berücksichtigt werden, dass das trockene und gemahlene Pflanzenmaterial nur das spektrale Verhalten der Trockensubstanz *per se* widerspiegelt, die räumliche Anordnung von Blättern, die Ökophysiologie, der Wassergehalt und anatomische Anpassungen der intakten Blätter die Aufheizbarkeit der Pflanze *in situ* aber wesentlich modifizieren.

Da im Rahmen der Untersuchung kein für Feldmessungen an intakten Pflanzen geeigneter Spektroradiometer (z.B. ASD Field Spec) zur Verfügung stand, wurden die getrockneten und gemahlene Pflanzenproben NIRS-Analysen unterzogen. Die bei frischen Blättern zu beobachtenden typischen Wasserabsorptionsbanden bei Wellenlängen von 980 und 1150 bzw. bei 1450 und 1950 nm wurden somit außer Acht gelassen und es konnten somit die rein auf die unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung zurückgehenden spektralen Charakteristika der Pflanzen miteinander verglichen werden.

Die NIR Spektren aller Arten wurden mittels einer partiellen linearen Regression (partial least-squares regression, PLSR) auf die erhobenen Daten (SLA, Blattfläche und Temperaturverhalten, später auch CN und ^{13}C) gefittet, um Zusammenhänge erkennen zu können. Abbildung 31 zeigt die in den Trockenmassen der 34 betrachteten Arten aufgenommenen NIR-Spektren. Die gelb markierten Arten 20 (*Galium verum*) und 32 (*Papaver rhoeas*) hatten in einem Wellenlängenbereich von 1000 nm besonders hohe Absorptionswerte. Da die beiden Arten Vertreter der Gruppe mit im Mittel recht hohen Blattemperaturen waren, wurde zunächst angenommen, dass das thermische Verhalten auch durch die stoffliche Zusammensetzung beeinflusst wurde.

NIR Spektren aller Arten

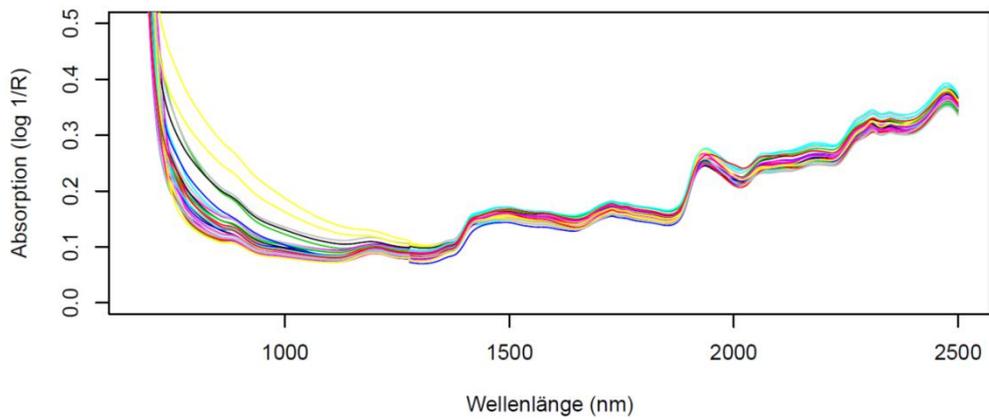


Abbildung 31: Nahinfrarot-Spektren (NIR) der trockenen und gemahlenen Pflanzenproben von 34 im Versuch betrachteten Arten (Mittelwerte aus drei im Versuch benutzten Wiederholungen).

NIR-Spektren unterschiedlicher Arten und unter verschiedenen Bedingungen aufgewachsener Pflanzen lassen sich mit dem bloßen Auge nicht differenzieren, so dass erst chemometrische Verfahren näheren Aufschluss über vorhandene Unterschiede geben und Zusammenhänge mit unabhängigen Variablen erkennen lassen. Die PLSR zwischen NIRS und verschiedenen Parametern lieferte einige zufrieden stellende Ergebnisse, die zur Vorhersage nicht gemessener Variablen genutzt werden könnten (s. Abb. 32).

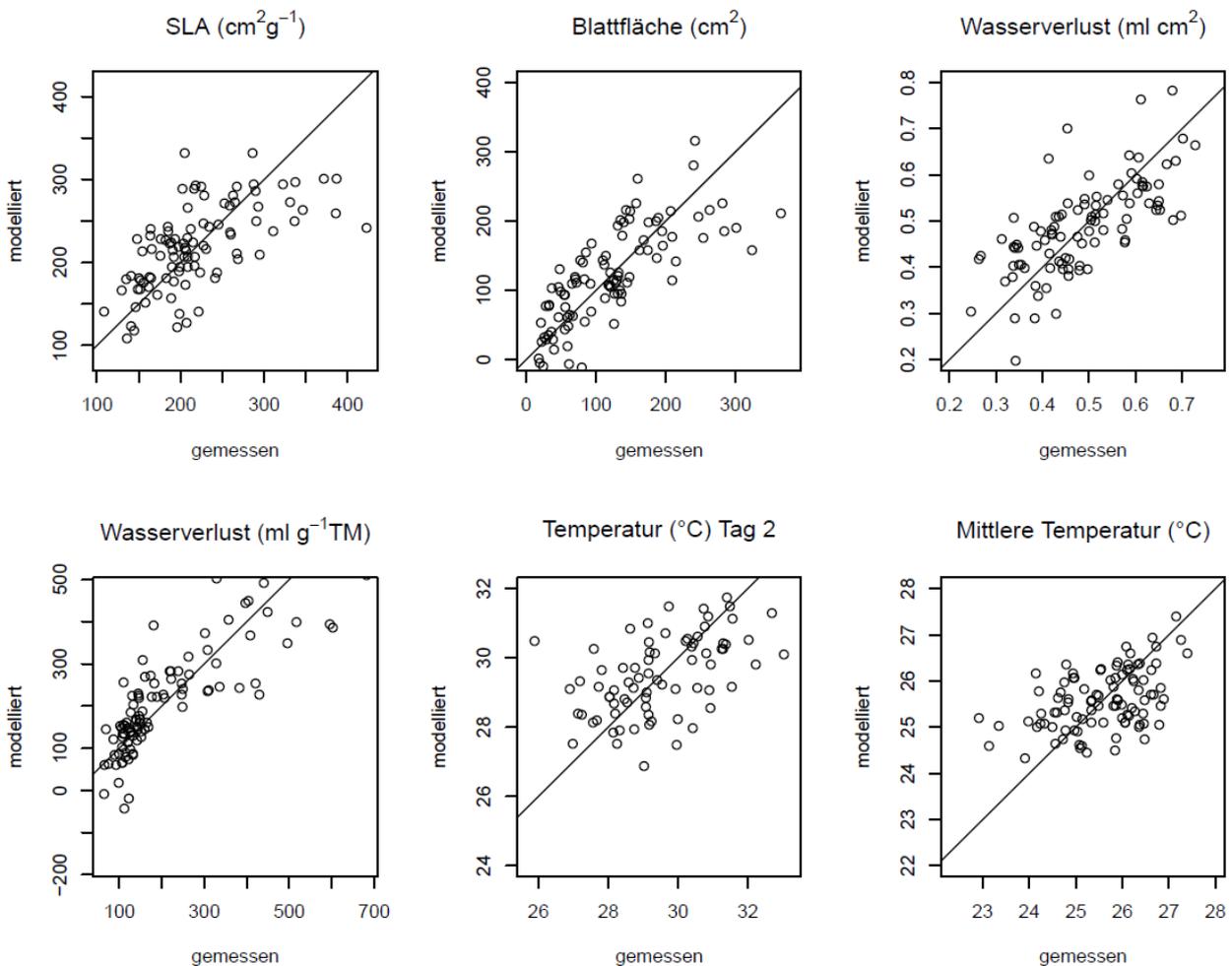


Abbildung 32: Kreuzvalidierung der aus den NIR-Spektren mittels PLSR vorhergesagten Daten mit tatsächlich erhobenen Messwerten. Bei der Modellierung wurden zehn Fitting-Komponenten als latente Variablen gewählt.

So zeigten über die 34 untersuchten Arten, d.h. über verschiedene taxonomische Einheiten, modellierte und gemessene Daten bei der Blattdichte (SLA) und dem Wasserverlust pro Flächeneinheit einen Zusammenhang. Es kann z.B. vermutet werden, dass Blätter mit einer hohen Blattdichte ähnliche Strukturkohlenhydrate (z.B. Cellulosen, Hemicellulosen, Lignine) aufweisen, die bei der NIR-Analyse ähnliche Molekülschwingungen bewirken. Auch der Wasserverlust pro Fläche könnte in der Verwendung bzw. Synthese von Stoffen liegen, die den Wasserhaushalt regulieren. Die im getrockneten und gemahlten Material aufgenommenen NIR-Spektren waren aber erwartungsgemäß nicht gut zur Vorhersage der zuvor an intakten Pflanzen gemessenen Blatttemperaturen geeignet.

5 Gesamtdarstellung und Ausblick

5.1 HINTERGRUND

Es kann davon ausgegangen werden, dass städtische Begrünungen bzw. *grüne Infrastrukturen* neben ihrer gestalterischen Attraktivität wichtige ökologische Funktionen (*ecological services*) übernehmen, die im Rahmen des sich anbahnenden Klimawandels, der vielerorts immer noch problematischen Luftreinhaltung und des allgemein beobachteten Artenschwunds zunehmend an Bedeutung gewinnen. Im Rahmen des Programms KLIMOPASS Teil 2 der LUBW, in dem Fragestellungen zu einer an die Klimafolgen angepassten und klimaschützenden Siedlungs-, Bau- und Infrastruktur bearbeitet werden, wurde im Spätsommer des Jahres 2013 durch das Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie der Universität Hohenheim unter Beratung des Deutschen Dachgärtner Verbands (DDV) ein Pilotprojekt zur Kühlwirkung und Abflussverringerung der extensiven Dachbegrünung etabliert. Allgemeine Hypothese des Forschungsprojekts war, dass extensive Dachbegrünungen die in Zukunft erwarteten häufigeren Starkregenereignisse erheblich abpuffern können, da ein Teil des Wassers im Pflanzenbestand verbleibt. Gleichzeitig kann sich die Niederschlagsretention in der Vegetationsschicht und die anschließende Transpiration der Pflanzen positiv auf das Mikroklima auswirken und in der Umgebung zu einer Abkühlung führen.

5.2 METHODIK

Um diese Effekte näher untersuchen zu können, wurden Versuche mit verschiedenen Mono- und Mischkulturen von häufig zur Dachbegrünung verwendeten Pflanzenarten aus verschiedenen funktionellen Typen (Kräuter, Gras, Leguminose, Sukkulente) etabliert. Sämtliche dazu verwendeten Ressourcen (Flachballenpflanzen, Substrat und der vierschichtige Aufbau) entsprachen den in der Praxis eingesetzten Materialien. Es wurden insgesamt 128 große Pflanzschalen benutzt, welche auf einer ebenen Fläche auf dem Gelände der Universität Hohenheim aufgestellt wurden und zur Vermeidung etwaiger Platzierungseffekte regelmäßig rotiert wurden. Insgesamt wurden 15 Bepflanzungsvarianten mit acht Wiederholungen pro Variante sowie eine unbepflanzte Kontrollvariante angefertigt. In den Versuchen wurden die typischen Gründacharten Blaues Sandschillergras (*Koeleria glauca* L.), die Leguminose Hornklee (*Lotus corniculatus* L.), die Kartäusernelke (*Dianthus carthusianorum* L.), der Zwergstrauch Sandthymian (*Thymus serpyllum* L.) und die vielfach verwendete, sukkulente Fetthenne (*Phedimus floriferus* L.) benutzt. Die Arten wurden in einheitlicher Pflanzdichte von 12 Individuen pro Schale in Monokulturen sowie in Zweifach- und Dreifachmischungen mit *Phedimus* kultiviert, so dass die intra- bzw. interpezifische Konkurrenz beurteilt werden konnte. Um den Wasserrückhalt in den einzelnen Gründach-Mesokosmen bestimmen zu können, wurde der Regenwasser-Durchfluss regelmäßig erfasst und in Beziehung zur Niederschlagsmenge gesetzt. Damit die Menge des im Boden verbleibenden und über die Oberfläche evapotranspirierten Wassers ermittelt werden konnte, wurden die Schalen ab dem Frühjahr 2014 zusätzlich wöchentlich gewogen. In dem jeweils gesammelten Perkolat wurden anschließend Leitfähigkeit und pH gemessen, so dass Aussagen auch zum über die Zeit erfolgten Stoffaustrag gemacht werden konnten. Um die Entwicklung der Pflanzen untersuchen zu können, wurde die Vitalität und Phänologie der fünf eingesetzten Arten regelmäßig erfasst. Zudem wurde die über die Zeit zunehmende Deckung der Mesokosmen monatlich bestimmt. Schließlich erfolgte am Ende des Versuchs bei der Hälfte der Mesokosmen eine nach Arten differenzierte Ernte, welche Aussagen zur Produktivität und Konkurrenzeffekten ermöglichen sollte.

Die Anlage der Freilandversuche (Arbeitspaket 1) mit einer großen Anzahl von Gründach-Mesokosmen auf dem Gelände der Universität Hohenheim erwies sich insgesamt als erfolgreich. Der **Witterungsverlauf** im einjährigen Zeitraum des Projekts mit einigen Hitzewellen und vielen Starkregenereignissen im Sommer 2014 bot gute Rahmenbedingungen zur Untersuchung der Fragestellung, inwieweit Gründächer zur Abschwächung der negativen Effekte von Wetterextremen beitragen. Die Pflanzen bzw. Bestände konnten sich gut in den Pflanzschalen (Systemen bzw. Mesokosmen) etablieren und zeigten bereits im Herbst 2013 einen leichten Biomassezuwachs. Aufgrund des kurzen und milden Winters und der günstigen Witterung kam es im Frühjahr 2014 bei allen Pflanzen zu einem deutlichen Wachstumsschub, der sich nach der Anfang Mai erfolgten Düngung stetig fortsetzte. Lediglich bei der Art *Lotus corniculatus* starben während der vierwöchigen Trockenphase im März/April 2014 einzelne Individuen ab, so dass die Pflanzendichte in diesen Systemen geringer war. Die mäßig warme und feuchte Witterung ab Ende Juli sorgte für einen erneuten Wachstumsschub.

Für einzelne Ansätze stiegen die **Deckungen** seit Versuchsbeginn von ca. 10% auf bis zu 100% Ende August 2014. Durch die optimale Flächen- bzw. Raumnutzung aus dem Zusammenspiel der Wuchsform unterschiedlicher Arten wiesen die Zweifachmischungen (insbesondere *Phedimus* mit *Lotus*), gefolgt von den Dreifachmischungen (insbesondere *Phedimus* mit *Lotus* und *Dianthus* bzw. *Koeleria*) sowohl die höchsten mittleren Deckungen als auch die höchste Produktivität auf. Die Präsenz der Leguminose hatte in der Zweifachmischung mit *Phedimus* einen wachstumsfördernden Effekt. Als besonders robust und langlebig, auch in Monokultur, erwiesen sich die Arten *Koeleria* und *Phedimus*. Bei den Thymus-Monokulturen hingegen kam es Ende Juni 2014 zum Absterben beinahe aller Pflanzen, jedoch konnte die Ursache dafür nicht ermittelt werden. Nach dem ersten Blühaspekt im Frühjahr wurde bei *Lotus* und *Dianthus* ab Anfang August 2014 eine zweite Blühphase beobachtet. In dieser Periode gab es einen starken Zuwachs der Biomasse und der Deckung, besonders bei den Arten *Phedimus*, *Lotus* und *Dianthus*. Das längste Blühfenster zeigten *Dianthus* und *Phedimus* (April-September), die stärkste Aussamung und Etablierung von Jungpflanzen war bei *Dianthus* zu beobachten. Auch bei *Lotus*, *Thymus* und *Koeleria* liefen einige Jungpflanzen aus den zuvor ausgefallenen Samen auf.

Die im **Durchfluss bestimmten chemischen Parameter** pH, Leitfähigkeit und die daraus berechnete Stoffaustragsmenge zeigten nur geringe Unterschiede zwischen bepflanzten und unbepflanzten Systemen. Auch innerhalb der bepflanzten Mesokosmen war keines der Systeme besonders auffällig. Seit dem Beginn des Versuchs reduzierte sich der Stoffaustrag über perkolierendes Wasser erheblich, was auf eine Stabilisierung bzw. Konditionierung der Systeme durch die allmähliche Bodensetzung hindeutet. Die Systeme der Monokulturen mit *Dianthus* und *Thymus* zeigten den höchsten Austrag. Als bodenstabilisierend und damit erosionsmindernd können dagegen *Koeleria*, *Phedimus* und *Lotus* angesehen werden, da sie insgesamt geringe kumulative Stoffaustragsmengen in Monokultur aufwiesen. Im Frühjahr 2014 wurde in allen Systemen nach anfänglich steigenden pH-Werten eine erhöhte Azidität festgestellt. Dies lässt sich vermutlich auf die mit dem Beginn des Wachstums einhergehende vermehrte Wurzelaktivität bzw. die Abscheidung organischer Säuren in die Rhizosphäre zurückführen. Zum Spätsommer 2014 hin pendelten sich die Werte wieder auf höhere pH-Werte ein, was mit dem verlangsamten Wachstum der Pflanzen in Verbindung stehen könnte.

Unabhängig von der Artzusammensetzung führte die Bepflanzung zu einer signifikant höheren **Niederschlagsretention** gegenüber den unbepflanzten Kontrollschalen. Im Mittel über den einjährigen Zeitraum betrug diese 14% und gegenüber der gesamten Niederschlagsmenge sogar 30%. Nach der Etablierung der

Systeme bzw. ab dem Frühjahr ergab sich eine Wasserretention von 20% gegenüber der unbepflanzten Kontrolle. Im Mittel konnten die bepflanzten Mesokosmen 39% des in der sechsmonatigen Vegetationsperiode gefallenen Niederschlags zurückhalten. Als besonders effektiv in ihrer Wasserspeicherkapazität erwiesen sich die Systeme, in denen *Koeleria* und *Lotus* vertreten waren, wohingegen die größten Durchflussmengen in den *Phedimus*-Monokulturen gemessen wurden. Diese Ergebnisse können zum Teil auf die Wurzelarchitektur und den Habitus der Arten (Wuchsform, Blattoberfläche) zurückgeführt werden. Vor allem das große Wurzelsystem des Grases dürfte gut geeignet sein, Wasser im Boden zu halten. Bei der Sukkulente dürften die glatten runden Blätter dafür verantwortlich sein, dass eingehender Niederschlag schnell abtropft und somit weniger Wasser in der Vegetationsschicht (Interzeption) verbleibt.

Die für die bepflanzten Systeme ermittelte mittlere kumulative **Evapotranspirationsmenge** war 1,5-fach so hoch als die allein über das Substrat in den Kontrollschalen evaporierte Wassermenge. Über die Oberfläche der unbepflanzten Kontrollen verdampften in dem sechsmonatigen Zeitraum 31,7 kg Wasser. Diese Menge entsprach einer Evaporation von 122 mm bzw. L pro m². Bei den mit Pflanzen ausgestatteten Mesokosmen kam zu der Evaporation über den Boden die Transpiration über die Pflanzen hinzu. Im Mittel über die 15 Mesokosmen wurde eine Evapotranspirationsmenge von 48 kg (185 mm) ermittelt. Dieser Wert entsprach der in den Mesokosmen zurückgehaltenen Wassermenge. Interessanterweise war für die Sukkulente neben der Niederschlagsretention auch dieser aus gravimetrischen Erhebungen abgeleitete Versuchsparameter gegenüber den anderen Pflanzenarten deutlich reduziert, die im Verhältnis dazu gebildete Biomasse jedoch weitaus größer als in anderen Ansätzen. *Phedimus* wäre demnach in Monokultur nicht optimal geeignet, Wasser im Substrat zu speichern bzw. das System kontinuierlich über Transpirationssäule abzukühlen. In Mischung gepflanzt, beispielsweise mit *Koeleria* und *Lotus*, für welche die höchste Evapotranspiration und eine hohe Kühlleistung verzeichnet wurden, kann diese beständige und sehr Hitze tolerante Art jedoch durchaus positive Effekte auf den Gesamtwasserhaushalt und die Kühlleistung haben. Als fakultative CAM-Pflanze kann *Phedimus* ihren Photosynthesemechanismus den herrschenden Witterungsbedingungen anpassen. Im CAM-Modus nimmt sie das für die Photosynthese notwendige CO₂ in den kühleren Morgen- und Abendstunden auf, wodurch der Wasserverlust minimiert und gleichzeitig ein Beitrag zur Verlängerung des „Kühlfensters“ des Gesamtsystems geleistet wird. Zudem trägt der bodendeckende üppige Wuchs der Art zur Beschattung des Substrats bei, was die Evaporation insgesamt verringert und die Aufheizung im Tagesverlauf verzögert.

Eine im Tagesverlauf gegenüber der Luft verzögerte **Erwärmung des Substrats** konnte anhand der Messung von Bodentemperaturen für die Monokulturen besonders während des Frühjahrs beobachtet werden. Über die gesamte Messperiode ergaben sich sowohl Unterschiede der mittleren Bodentemperaturen im Tagesverlauf als auch ein saisonal abhängiger Bodenkühlungseffekt. Während die Substrate der mit Pflanzen bestandenen Systeme im Winter etwas wärmer als die Böden der Kontrollen waren (Isolationseffekt vor allem durch *K. glauca* und *P. floriferus*), konnte in der Vegetationsperiode ein Kühlungseffekt verzeichnet werden. Im Frühjahr war der Boden in den Monokulturen von *T. serpyllum* und *L. corniculatus* mittags gegenüber dem Boden der unbewachsenen Kontrolle um im Mittel 0,4°C kühler, nachts aber 0,4°C wärmer als das Substrat der Kontrolle. Hinter dem im März und April beobachteten gegenläufigen Tagesgang des Temperaturprofils im mit *Phedimus* bestandenen Bodensubstrat wird die CAM-Physiologie der Art vermutet. In den Folgemonaten war der Kühleffekt aber nicht mehr nachmittags und abends, sondern während der gesamten hellen Zeit ausgeprägt. Die Böden waren bis zu 2°C kühler als die Böden der unbepflanzten Kontrollen, obwohl die Art im Vergleich zu den anderen Arten zu höheren Durchflussraten führte. *Phedimus* zeigte schließlich einen größeren Kühleffekt als die anderen Arten, der bis in den Spätsommer anhält. Ein Grund hierfür könnte auch die vergleichsweise flache Wuchsform der Art sein, was bei dieser mit dickfleischigen

Blättern ausgestatteten Art zur Ausprägung eines länger andauernden Schattierungseffekts führt. Die Ergebnisse legen insgesamt nahe, dass das Substrat unter der Dachbegrünung in kühlen Jahreszeiten als Temperaturpuffer fungieren und in warmen Jahreszeiten in Abhängigkeit vom aktuellen Wassergehalt für einen Kühlungseffekt sorgen kann. Eine Bepflanzung erhöht diese Pufferwirkung und sollte *Sedum*- bzw. *Phedimus*-Arten beinhalten, da diese den größten Bodenkühlungseffekt haben. Allerdings gilt dies vermutlich nur für Arten mit flach liegenden, den Boden gantztägig beschattenden Blättern und nicht für aufrecht wachsende Arten.

Von allen 15 Bepflanzungsvarianten, den Kontrollen sowie von dem als Referenzen benutzen dunklem Lava-Bims Substrat und hellem Quarzkies wurden thermographische Aufnahmen mittels einer Infrarotkamera angefertigt. Diese Aufnahmen sollten es ermöglichen, **Unterschiede der Oberflächentemperaturen** zwischen den untersuchten Varianten und den unterschiedlichen Materialien aufzudecken. Die Aufnahmen erfolgten mittags in einem definierten Abstand von den Mesokosmen und die digitalen Bilder wurden anschließend mit einer Software ausgewertet. An insgesamt sechs Messterminen zwischen Ende Mai und Ende Juli 2014 konnten repräsentative Temperaturmessungen aller Mesokosmen gemacht werden. Die mittleren Oberflächentemperaturen der unbepflanzten Kontrollschalen lagen an jedem der sechs Termine deutlich, zumeist etwa 5°C über denen der bepflanzten Systeme. Gleichzeitig war das dunkle Lavasubstrat um 3-5°C wärmer als die im Versuch benutzte Systemerde, jedoch erwärmte sich das aus Ziegelsplitt bestehende Material etwas stärker als der ebenfalls als Referenzmaterial benutzte helle Kies.

Aufgrund der großen Standardabweichungen zwischen den acht Wiederholungen einer Variante konnten für die Temperaturmittel zwischen den 15 Pflanzvarianten nur wenige statistisch signifikante Unterschiede festgestellt werden. Die mit *Koeleria* und *Lotus* ausgestatteten Mono- und Mischkulturen erwiesen sich als etwas kühler als die aus anderen Arten aufgebauten Systeme. Die Unterschiede betrugten allerdings nur wenige zehntel Grad. Nach dem Absterben der *Thymus*-Pflanzen in den Monokulturen waren diese 5-7°C wärmer als die anderen Varianten und genauso warm wie die Kontrollen. Dieses Ergebnis unterstreicht die Bedeutung, möglichst langlebige bzw. gegenüber Hitze und Schädlingen tolerante Pflanzen in Gründächern zu verwenden und schon bei der Lieferung der Pflanzen auf eine hohe Vitalität zu achten. Außerdem zeigte sich, dass die Bestände mit höheren Deckungsgraden kühler waren. Eine höhere Pflanzendeckung trägt demnach maßgeblich zu einer höheren Kühlwirkung bei. Eine hohe Deckung gekoppelt mit niedrigeren Temperaturmitteln war durchweg bei den Mischungen aus *Lotus* und *Phedimus* zu beobachten. Die Monokulturen von *Koeleria* und *Dianthus*, sowie die 2er- Mischungen mit diesen horstartig wachsenden bzw. hochwüchsigen Arten wiesen hingegen geringere Deckungsraten auf. Bei solchen Horst bildenden Arten kann eine höhere Pflanzdichte ggf. einen besseren Kühleffekt bewirken.

Zum Nachweis der **Transpirationskühlung** sollten die Ergebnisse der thermometrischen Analysen auch mit der Menge des evapotranspirierten Wassers verknüpft werden. Erwartungsgemäß bestand ein Zusammenhang zwischen beiden Parametern. Systeme mit höheren Transpirationsraten, z.B. die mit *Lotus* bestandenen Mesokosmen, wiesen die geringsten mittleren Temperaturen auf. Ein optimales System sollte jedoch auch bei geringer Evapotranspirationsrate einen Kühleffekt aufweisen. Diesbezüglich erwiesen sich besonders die Mischungen mit *Phedimus* und *Lotus* als geeignet.

In einem die **Freilanduntersuchung begleitenden Gewächshausversuch** (Arbeitspaket 2) wurden ab Dezember 2013 zunächst Keimverhalten, Wachstum und anatomische Eigenschaften von 50 typischen Pflanzenarten, die zur extensiven Begrünung von Dächern eingesetzt werden, untersucht. Von den ausgewählten Arten keimten 47, aber nur 37 keimten in genügender Anzahl und konnten in weiteren Untersuchungen zur

Pflanzenentwicklung und des Wachstums während der Etablierungsphase herangezogen werden. In einem daran anschließenden einwöchigen Austrocknungsversuch mit immer noch 34 Pflanzenarten, von denen genügend gleich alte Wiederholungen zur Verfügung standen, zeigte sich eine positive Beziehung zwischen der vorhandenen Blattfläche und der Evapotranspiration (gravimetrisch bestimmter kumulativer Wasserverlust). Diese Beziehung war allerdings nicht linear, was auf Schattierungseffekte bei steigender Blattfläche und der Überlappung mehrerer Blätter zurückgehen dürfte. Zudem wurde eine positive lineare Beziehung zwischen der evapotranspirierten Wassermenge und den mittleren Blatttemperaturen gefunden. Arten, die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt mehr Wasser als andere transpiriert hatten, wiesen in der am nachfolgenden Tag durchgeführten infrarotthermographischen Messung höhere Blatttemperaturen auf. Hiermit konnte gezeigt werden, dass es nach dem starken Verlust von Wasser über die Transpiration mitunter schnell zu einem Aufheizen des Blattes kommt (Umkehr des Kühleffekts). Andererseits zeigten flach wachsende Rosettenpflanzen niedrigere Blatttemperaturen und eine geringere Aufheizung als höherwüchsige Pflanzenarten und schmalblättrige Gräser. Letztere verlieren aufgrund ihrer besseren atmosphärischen Kopplung schneller Wasser und weisen daher eine kürzere Dauer des kühlenden Effekts auf. Niedrig wüchsige großblättrige Arten dagegen erwiesen sich im Versuchsranking als kühlsche Pflanzen, vermutlich weil sie den Boden stärker beschatteten und damit die Evapotranspiration reduzierten.

Im Berichtszeitraum wurde schließlich die aktuelle internationale Literatur zum Thema ausgewertet und in den vorliegenden Bericht eingearbeitet. Viele dieser Arbeiten bestätigten die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse. Dennoch gab es eine Reihe widersprüchlicher Angaben zur Kühlwirkung der extensiven Dachbegrünung, was auf die unterschiedlichen Ansätze, unterschiedliche Rahmenbedingungen und Zielsetzungen zurückgeht. Bei den meisten Studien handelt es sich um modellhafte Untersuchungen und kurzfristige Experimente unter künstlichen Bedingungen, aus denen nur schwer allgemeingültige Aussagen zur längerfristigen Eignung extensiver Gründachbepflanzungen als klimawirksame grüne Infrastrukturen abgeleitet werden können.

5.4 GESAMTFAZIT

In dem einjährigen Versuch konnten einige wertvolle Erkenntnisse zu den ökologischen Dienstleistungen Niederschlagsretention und Kühlleistung der extensiven Dachbegrünung gewonnen werden. Insgesamt ergab sich aus der Zusammenführung der verschiedenen Einzelergebnisse bzw. Versuchsparameter, dass Pflanzmischungen mit den besonders robusten Arten Goldfethenne (*Phedimus*) und Sandschillergras (*Koeleria*) und der starkwüchsigen Leguminose (*Lotus*) die besten Ergebnisse in Bezug auf eine lang anhaltende Kühlleistung erzielten. Die durch die Pflanzen modulierten positiven Effekte auf das Mikroklima ergaben sich aus der Verringerung des Abflußbeiwerts und der nachfolgenden Transpiration des im System verbleibenden Wassers. Pflanzenmischungen mit hohen Deckungsgraden wiesen erwartungsgemäß eine höhere Niederschlagsretention und Evapotranspiration auf als Bestände mit geringerer Deckung. Monokulturen der Goldfethenne führten zu den höchsten Abflußraten und Stoffausträgen, während das Gras und die Leguminose am meisten Niederschläge zurückhalten konnten.

Durchweg hohe Deckungen ergaben sich in den aus mehreren Arten aufgebauten Systemen, wobei die Verwendung der Leguminose *Lotus* aufgrund der Fixierung von Luftstickstoff zu einer besseren Nährstoffversorgung und der Erhöhung Produktivität führte. Es bestätigte sich somit, dass Systeme mit einer höheren pflanzlichen Biodiversität und Ressourcennutzung bessere und länger andauernde ökologische Dienstleistungen als einfach aufgebaute Bestände ermöglichen.

Beim Sandthymian starben vermutlich infolge von extremer Trockenheit und Pflanzenkrankheiten zu Versuchsende viele Pflanzen ab. Monokulturen waren davon deutlich stärker betroffen als Mischungen mit anderen Pflanzenarten, was auf einen besseren Schutz des Thymians in Gemeinschaft mit anderen Arten hindeutet. Der Einbruch der Bestände äußerte sich in einer sprunghaften Erhöhung des Abflusses und einer starken Aufheizung des Substrats. Auch bei der Kartäusernelke und bei der Leguminose starben einige Pflanzen ab, wobei beide Arten eine starke Tendenz zur Aussamung und Etablierung von Jungpflanzen aufwiesen. Die Fähigkeit zur Reproduktion einzelner Pflanzenarten wird langfristig die Sukzession von Gründächern beeinflussen, jedoch lassen die Ergebnisse des vorliegenden Versuchs keine Aussagen zu Veränderungen der Pflanzengesellschaften der Extensivdachbegrünung zu. Dennoch können die im Versuch verwendeten Arten Goldfethenne und Sandschillergras als robuste und vermutlich langlebige Pflanzenarten bezeichnet werden, die über lange Zeiträume wichtige Funktionen bei der Schaffung eines günstigen Mikroklimas besitzen.

5.5 EMPFEHLUNGEN UND AUSBLICK

Aus den Ergebnissen des Versuchs werden die folgenden Empfehlungen für die Etablierung von Pflanzenbeständen abgeleitet, die vorrangig darauf abzielen, neu angelegte Extensivdachbegrünung hinsichtlich ihres positiven Effekts auf das Mikroklima zu optimieren. Einige der Empfehlungen können aber auch bei der Reaktivierung bzw. Regenerierung von alten Dachbegrünungen berücksichtigt werden.

- Um Gründächer mit einer von Beginn an möglichst hohen Niederschlagsretention und Kühlleistung zu konstruieren, sollten vorgezogene Flachballenpflanzen anstatt von Saatmischungen verwendet werden. Diese Vorgehensweise stellt eine weitgehend sichere Etablierungsmethode dar und kann im Gegensatz zu Aussaaten eine definierte Zusammensetzung der Bestände mit bestimmten Zielarten garantieren, da die im Handel verfügbaren Pflanzen in der Regel eine hohe Qualität aufweisen und gut angehen. Keimraten von ausgesäten Pflanzen variieren stark und es kann zur Bildung von Beständen mit nur wenigen dominanten Arten kommen. Zudem muss bei ungünstiger Witterung anfangs viel zusätzlich bewässert werden.
- Als „Grundgerüst“ neu angelegter Bestände sollten robuste und langlebige Arten wie das horstartig wachsende Gras *Koeleria* und die flachwüchsige sukkulente *Phedimus* verwendet werden. Die Kombination dieser Pflanzentypen bzw. allgemein von Gras-Sedum-Mischungen hat sich schon seit langem bewährt. Während das Gras aufgrund seines aufrechten Wuchses einen geringeren Grenzschichtwiderstand hat und stärker transpiriert als die Sukkulente, kann letztere aufgrund ihres flachen Wuchses zur Beschattung und Kühlung des Substrats führen. Im Versuch mit Monokulturen der Arten konnte das Gras vermutlich aufgrund seines großen Wurzelsystems deutlich mehr Niederschlagswasser zurückhalten als die mit nur wenigen Wurzeln ausgestattete Goldfethenne. In Mischungen der beiden Pflanzentypen dürfte jedoch die stärkere Erschließung des Wurzelraums durch das Gras vorteilhaft sein.
- Die gleichzeitige Nutzung einer schwachwüchsigen Leguminose wie *Lotus* in der Anfangsbepflanzung oder zur Nachverdichtung in bereits etablierten Beständen kann die längerfristige Versorgung von Gründächern mit Stickstoff deutlich verbessern, so dass der Pflegeaufwand zur Erhaltung der Bestände bzw. die Düngung reduziert werden kann. Die

Art erwies sich im Versuch zudem als Überlebenskünstler und schlug nach einer regenreichen Periode im Sommer schnell wieder aus den zuvor abgetrockneten Ausläufern aus.

- Auch der Einsatz von Flachballenpflanzen weniger ausdauernder Arten ist anzuraten, wenn es sich dabei um leicht aus Samen regenerierbare Arten wie *Dianthus* handelt. Letztere attraktive Art hat zudem ein sehr langes Blühfenster.
- Die anfängliche Bepflanzung sollte nicht zu dicht sein, d.h. nicht über ca. 20 Pflanzen pro Quadratmeter liegen, damit nach erfolgreicher Etablierungsphase weitere Pflanzenarten über Einsaat eingebracht werden können. Eine zu hohe Deckung und eine zu große Pflanzenmasse könnte auch dazu führen, dass sich nur wenige Samen aus natürlichem Anflug etablieren.
- Die Ansiedlung der Spontanvegetation höherer Pflanzen über die Ausbreitung von Samen mit dem Wind oder durch Vögel ist generell zu begrüßen, sofern dies nicht zu Bildung von Massenbeständen führt.
- Auch die spontane Ansiedlung von Moosen und Flechten ist insgesamt zu begrüßen. Diese niederen Pflanzen haben aber ihre Hauptwuchszeit im Winter und tragen daher nicht aktiv zum Kühleffekt im Sommer bei. Sie haben aber eine gewisse Bedeutung, Niederschlagswasser zu binden, obwohl sie keine Wurzel haben. In den zwischen höheren Pflanzen aufgebauten Polstern und als Flechtenüberzüge bzw. in der abgestorbenen Biomasse können niedere Pflanzen auch im Sommer etwas Wasser speichern. Zu dichte Moospolster bzw. zu dichten Flechtenschichten, vor allem an beschatteten Stellen können aber das Wachstum und die Ansiedlung von höheren Pflanzen behindern.

Die Etablierung einer Gründachvegetation aus Samen bzw. aus Samenmischungen wurde im vorgestellten Projekt nicht behandelt. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Methode der Bepflanzung nicht automatisch unterlegen ist. In der Praxis werden jedoch oft Saatmischungen botanisch nicht ausreichend charakterisierter Arten anstatt vorgezogener Pflanzen bestimmter Arten benutzt, so dass nicht vorherzusagen ist, welche Arten sich nachfolgend tatsächlich etablieren werden. Zudem kommt es beim Ausbleiben von Erfolgskontrollen sowie geeigneter Pflege- und Regenerationsmaßnahmen bereits nach einigen Jahren zur Verarmung der Bestände bzw. zur Dominanz nur weniger Arten.

Zukünftige Ansätze sollten insgesamt auf die Erhöhung der pflanzlichen Diversität in der extensiven Dachbegrünung und die Schaffung langlebiger Pflanzengemeinschaften abzielen, damit die ökologischen Funktionen (Niederschlagsretention, Verbesserung des Mikroklimas aber auch ästhetische Funktionen) dauerhaft erfüllt werden können.

Bezüglich der Optimierung der Niederschlagsretention verschiedener Dachbegrünungsvarianten sollte zukünftig nicht nur der Substrat- und Aufbauwahl, sondern auch der auf dem Dach etablierten Vegetation mehr Beachtung geschenkt werden. Bei der Bewertung der Abflussbeiwerte und Abflusskennwerte von Dachbegrünungen (FLL 2008) werden nämlich bislang nur unbegrünte Bauweisen herangezogen. Von dem gemessenen Wert werden dann aber 0.05 Einheiten abgezogen, um den Einfluss potentieller Vegetation abschätzen zu können. In dem Verfahren werden der Vegetation somit lediglich maximal 5% der Abfluss-verzögernden Wirkung zugestanden, obwohl im vorliegenden Versuch ein bepflanzter Aufbau im Mittel 20% mehr Nie-

erschlagswasser als ein vegetationsfreier zurückhalten bzw. über die Transpiration in die Atmosphäre zurückführen konnte.

Neuerdings wird auch den Naturschutzaspekten mehr Aufmerksamkeit gewidmet, da Dachbegrünungen den voranschreitenden Flächenverbrauch kompensieren und wertvolle Ersatzlebensräume für Pflanzen und Tiere schaffen können. Zusätzlich zur Berücksichtigung dieser Aspekte bei der Neuanlage von Extensivbegrünungen sollte auch eine Qualitätsoffensive erfolgen, die darauf abzielt, bestehende Dachbegrünungen zu revitalisieren. Neben der Bepflanzung mit neuen Arten bzw. der Nachsaat sollte dabei ein weiterer Schwerpunkt auf die Ausbringung neuer Substrate gelegt werden, damit es zur Erhöhung nicht nur der Biodiversität sondern auch der Lebensraumvielfalt kommen kann. Es ist zudem sicherzustellen, dass regelmäßige ökologisch-botanische Kontrollen und fachlich fundierte Pflegemaßnahmen bzw. Bestandsregulierungen stattfinden, um diese grünen Infrastrukturen zu erhalten bzw. weiterzuentwickeln.

6 Literatur

- Ahrendt, J. (2007): Historische Gründächer: Ihr Entwicklungsgang bis zur Erfindung des Eisenbetons. Teil I. Dissertation, Technische Universität Berlin, 170 S.
- Alsup, S., Ebbs, S., Retzlaff, W. (2010): The exchangeability and leachability of metals from select green roof growth substrates. *Urban Ecosystems* 13: 91-111.
- Ansel, W., Baumgarten, H., Dickhaut, W., Kruse, E., Meier, R. (2011): Leitfaden Dachbegrünung für Kommunen. Nutzen- Fördermöglichkeiten – Praxisbeispiele. Deutscher Dachgärtner Verband (DDV), Nürtingen, 82 S.
- Ansel, W. (2012): Multi-Talent Dachbegrünung: Klimaschutz und Biodiversität. Deutsches Institut für Urbanistik (DIFU), 14 S.
- Augustenborg Botanical Roof Garden: <http://www.greenroof.se/>, abgerufen am 20.6.2014.
- Bach, H. (1995): Die Bestimmung hydrologischer und landwirtschaftlicher Oberflächenparameter aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten. In: Münchener Geographische Abhandlungen, Reihe B, Band 21.
- Baik, J.-J., Kwak, K.-H., Park, S.-B., Ryu, Y.-H. (2012): Effects of building roof greening on air quality in street canyons. *Atmospheric Environment* 61: 48-55.
- Baumann, N. (2006): Ground-nesting birds on green roofs in Switzerland: preliminary observations. *Urban Habitats* 4: 37–50.
- Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg (2014): Es wird grün auf Hamburgs Dächern. Hamburg hat eine „Gründach-Strategie“ entwickelt. <http://www.hamburg.de/pressearchiv-fhh/4296164/2014-04-08-bsu-gruendachstrategie/>, abgerufen am 23.09.2014.
- Bengtsson, L. (2005): Peak flows from thin sedum-moss roof. *Nordic Hydrology* 36: 269-280.
- Berdahl, P., Akbari, H., Rose, L.S. (2002): Aging of reflective roofs: soot deposition. *Applied Optics* 41: 2355–2360.
- Blanusa, T., Vaz Monteiro, M. M., Fantozzi, F., Vysini, E., Li, Y., Cameron, R.W.F. (2013): Alternatives to *Sedum* on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better ‘cooling service’? *Building and Environment* 59: 99-106.
- BMUB (2014): Hamburg entwickelt "Gründachstrategie" gegen den Klimawandel. Pressemitteilung Nr. 148/14, Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, www.bmub.bund.de/N51072/, abgerufen am 23.09.2014.
- Bliss, D.J., Neufeld, R. D., Ries, R. J. (2009): Storm Water Runoff Mitigation Using a Green Roof. *Environmental Engineering Science* 26: 407-417.
- BLWG (2002): Dachbegrünung, Vegetationstechnik, Pflanzenverwendung und Baustoffe, Wasserhaushalt, Verschiedenes. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Veitshöchheimer Berichte aus der Landespflanze, Heft 66, 167 S.
- Brueck, H. (2008): Effects of nitrogen supply on water-use efficiency of higher plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171, 210–219.
- Burszta-Adamiak, E. (2012): Analysis of the retention capacity of green roofs. *Journal of Water and Land Development* 16: 3-9.
- Butler, C., Orians, C.M. (2011): Sedum cools soil and can improve neighboring plant performance during water deficit on a green roof. *Ecological Engineering* 37: 1796-1803.
- BUWAL (1995): Ökologische Nischen und Ausgleichsflächen im Siedlungsraum unter besonderer Berücksichtigung der Extensivbegrünung. Schriftenreihe Umwelt Nr. 216, 57 S., Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

- Cameron, R.W.F., Blanuša, T., Taylor, J.E., Salisbury, A., Halstead, A.J., Henricot, B., Thompson, K. (2012): The domestic garden - Its contribution to urban green infrastructure. *Urban Forestry and Urban Greening* 11: 129-137.
- Caneva, G., Kumbaric, A., Savo, V., Casalini, R. (2013): Ecological approach in selecting extensive green roof plants: A data-set of Mediterranean plants. *Plant Biosystems*, 10 pp.
- Carter, T.L., Rasmussen, T.C. (2006): Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association* 42: 1261-1274.
- Chen, H., Ooka, R., Huang, H., Tsuchiya, T. (2009): Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation. *Building and Environment* 44: 2290–2299.
- Cheng, M.-D., Miller, W., New, J., Berdahl, P. (2012): Understanding the long-term effects of environmental exposure on roof reflectance in California. *Construction and Building Materials* 26: 516–526.
- Clark, C., Adriaens, P., Talbot, F.B. (2008): Green Roof Valuation: A Probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits. *Environmental Science and Technology* 42: 2155–2161.
- Clark, O.R. (1940): Interception of Rainfall by Prairie Grasses, Weeds, and Certain Crop Plants. *Ecological Monographs* 10: 243-277
- Compton, J.S. (2006): An examination of green roof plant selection and design to optimize for evapotranspiration. Master Thesis, pp. 69, Cornell University.
- Connop, S., Nash, C., Gedge, D., Kadas, G., Owczarek, K., Newport, D. (2013): TURAS green roof design guidelines: Maximising ecosystem service provision through regional design for biodiversity. University of East London, 53 pp.
- Cook-Patton, S., Bauerle, T. (2012): Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: A literature review. *Journal of Environmental Management* 106: 85-92.
- Costa, J.M., Grant, O.M., Chaves, M.M. (2013): Thermography to explore plant-environment interactions. *Journal of Experimental Botany* 64: 3937-3949.
- Coutts, A.M., Daly, E., Beringer, J., Taper, N.J. (2013): Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and Environment* 70: 266-276.
- Czemieli Berndtsson, J. (2010): Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering* 36: 351-360.
- DDV (2011): DDV-Praxisratgeber. Das 1 x 1 der Dachbegrünung. Deutscher Dachgärtner Verband e.V., Nürtingen, 50 S.
- DeNardo, J., Jarrett, A., Manbeck, H., Beattie, D., Berghage, R. (2005): Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 48: 1491-1496.
- Döveling, J. (2009): Zwei Jahrzehnte Gründachförderung in Stuttgart – Ein Erfahrungsbericht. In Appl, R. (Hrsg.) *Dachbegrünung in der modernen Städtearchitektur*, Tagungsband International Green Roof Congress Nürtingen, International Green Roof Association Berlin 2009, 190 S.
- Dunnett, N., Nagase, A., Booth, R., Grime, P. (2008): Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. *Urban Ecosystems* 11: 385-398.
- Dvorak, B., Volder, A. (2010): Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review. *Landscape and Urban Planning* 96: 197–213.
- Ellenberg, H., Weber, E.H., Düll, R., Wirth, V., Werner, W., Paulissen, D. (2001): *Zeigerwerte der Pflanzen in Mitteleuropa*, Scripta Geobotanica XVIII, 262 S., 3. Auflage. Verlag Erich Goltze, Göttingen.
- Emilsson, T. (2008): Vegetation development on extensive vegetated green roofs: Influence of substrate composition, establishment method and species mix. *Ecological Engineering* 33: 265–277.

- EPA (2008): Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Green Roofs, 29 S., US Environmental Protection Agency.
- Fang, C.F. (2010): Rainwater retention capacity of green roofs in subtropical monsoonal climatic regions: A case study of Taiwan. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 138: 239-249.
- Fassman-Beck, E., Voyde, E., Simcock, R., Hong, Y. (2013): 4 Living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation? *Journal of Hydrology* 490: 11-20.
- FBB (2014): Ergebnisse der bundesweiten Umfrage von FBB und NABU 2014. Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V. <http://www.fbb.de/dachbegruenung/foerderung/>, abgerufen am 15.10.2014.
- FFH (2012): Stadtklimatische Bestandsaufnahme und Bewertung für das Landschaftsprogramm Hamburg. Klimaanalyse und Klimawandelszenario 2050. Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Amt für Landes- und Landschaftsplanung, 81 S.
- FLL (2008): Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen, Bonn. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e.V., 118 S.
- Gaffin, S.R., Rosenzweig, C., Eichenbaum-Pikser, J., Khanbilvardi, R., Susca, T. (2010): A Temperature and Seasonal Energy Analysis of Green, White, and Black Roofs. Columbia University, 20 pp.
- Garcia-Estringana, P., Alonso-Blázquez, N., Alegre, J. (2010): Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs. *Journal of Hydrology* 389: 363-372.
- Gedge, D., Kadas, G. (2005): Green roofs and biodiversity. *Biologist* 52: 161-169.
- Getter, K., Rowe, D. (2006): The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience* 41: 1276-1285.
- Gnecco, I., Palla, A., Lanza, L., La Barbera, P. (2013): The Role of Green Roofs as a Source/sink of Pollutants in Storm Water Outflows. *Water Resources Management* 27: 4715-4730.
- Grams, T.E.E., Borland, A.M., Roberts, A., Griffiths, H., Beck, F., Lüttge, U. (1997): On the mechanism of reinitiation of endogenous Crassulacean acid metabolism rhythm by temperature changes. *Plant Physiology* 113: 1309-1317.
- Grams, T.E., Thiel, S. (2002): High light-induced switch from C₃-photosynthesis to Crassulacean acid metabolism is mediated by UV-A/blue light. *Journal of Experimental Botany* 53: 1475-1483.
- Gregoire, B.G., Clausen, J.C. (2011): Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering* 37: 963-969.
- Herfort, S., Tschuikowa, S., Ibañez, A. (2012): CO₂-Bindungsvermögen der für die Bauwerksbegrünung typischen Pflanzen. 38 S.
- Hübler, M., Klepper, G. (2007): Kosten des Klimawandels. Die Wirkung steigender Temperaturen auf Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Aktualisierte Fassung 07/2007. Studie des Instituts für Weltwirtschaft Kiel im Auftrag des WWW., 65 S.
- Jim, C.Y., He, H. (2010): Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem. *Ecological Engineering* 36:1052–1063.
- Jones, H.G., Archer, N., Rotenberg, E., Casa, R. (2003): Radiation measurement for plant ecology. *Journal of Experimental Botany* 54: 879-889.
- Jones, H.G., Serraj, R., Loveys, B.R., Lizhong Xiong, Wheaton, A., Price, A.H. (2009): Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology* 36: 978-989.
- John-Bejai, C., Farrell, A.D., Cooper, F.M., Oatham, M.P. (2013): Contrasting physiological responses to excess heat and irradiance in two tropical savanna sedge. *AoB PLANTS* 5: plt051, 11pp.
- Kern, H. (2009): Förderinstrumente für Dachbegrünung – Beispiel Karlsruhe. In Appl, R. (Hrsg.) Dachbegrünung in der modernen Städtearchitektur, Tagungsband International Green Roof Congress Nürtingen, International Green Roof Association Berlin 2009, 190 S.

- Köhler, M. (2006): Long-term vegetation research on two extensive green roofs in Berlin. *Urban Habitats* 4: 3–26.
- Kolb, W., Schwarz, T. (1999): *Dachbegrünung intensiv und extensiv*, Ulmer Verlag, 213 S.
- Körner, C.H., Scheel, J.A., Bauer, H. (1979): Maximum leaf diffusive conductance in vascular plants. *Photosynthetica*, 13: 45-82.
- Lamont, B.B., Bergl, S.M. (1991): Water relations, shoot and root architecture, and phenology of three co-occurring *Banksia* species: no evidence for niche differentiation in the pattern of water use. *Oikos* 60: 291-298.
- Landeshauptstadt Stuttgart, Garten- und Friedhofsamt (2003): *Dachbegrünung – aber wie?*
<http://www.stuttgart.de/img/mdb/publ/16710/39862.pdf>, abgerufen am 02.04.2014.
- Landeshauptstadt Stuttgart (2010): *Der Klimawandel – Herausforderung für die Stadtklimatologie*. Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz - Heft 3/2010, 88 S.
- Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz (2013): *Klimawandel- Anpassungskonzept Stuttgart KLIMAKS*. Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz Heft 1/2013, 80 S.
- Lee, J.Y., Moon, H.J. Kim, T.I., Kim, H.W., Han, M.Y. (2013): Quantitative analysis on the urban flood mitigation effect by the extensive green roof system. *Environmental Pollution* 181: 257-261.
- Leuzinger, S., Vogt, R., Körner, C. (2010): Tree surface temperature in an urban environment. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 56-62.
- Li, J.-F., Wai, O., Li, Y., Zhan, J.-M., Ho, Y., Li, J., Lam, E. (2010): Effect of green roof on ambient CO₂ concentration. *Building and Environment* 45: 2644-2651.
- Liu, K., Baskaran, B. (2003): Thermal performance of green roofs through field evaluation. In: *Proceedings for the First North American Green Roof Infrastructure Conference, Awards and Trade Show*, Chicago, IL., May 29-30 2003, pp. 1-10.
- Lowitt, P., Peck, S. (2008): *Planning for rooftops: The benefits of green roof infrastructure*. Planning Advisory Service Memo.
- LUBW (2013): *Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg Perspektiven aus regionalen Klimamodellen*. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Langfassung, 164 S.
- Lukeš, P., Stenberg, P., Rautiainen, M. Möttus, M., Vanhatalo, K. M. (2013): Optical properties of leaves and needles for boreal tree species in Europe. *Remote Sensing Letters* 4: 667-676.
- Lundholm, J., MacIvor, J., MacDougall, Z., Ranalli, M. (2010): Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions. *PLoS ONE* 5: e9677.
- Mann, G. (1996): Die Rolle begrünter Dächer in der Stadtökologie. *Biologie in unserer Zeit* 5: 292-299.
- MacIvor, J.S., Lundholm, J. (2011): Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering*, 37: 407–417.
- Maes, W.H., Steppe, K. (2012): Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany* 63: 4671-4712.
- Meier, F., Scherer, D. (2012): Spatial and temporal variability of urban tree canopy temperature during summer 2010 in Berlin, Germany. *Theoretical Applied Climatology* 110: 373–384.
- Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. (2006): Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* 77: 217–226.
- Miller, W.A., Cheng, M.D., Pfiffner, S., Byars, N. (2002): *The Field Performance of High-reflectance Single-ply Membranes Exposed to 2 Years of Weathering in Various US Climates*. Final Report to SPRI, Inc.
- Monterusso, M., Rowe, D., Rugh, C., Russell, D. (2004): Runoff water quantity and quality from green roof systems. *Acta Horticulturae* 639: 369-376.

- Mullen, J.D., Lamsal, M., Colson, G. (2013): Green roof adaptation in Atlanta, Georgia: The effects of building characteristics and subsidies on net private, public, and social benefits. *Environmental Science and Technology* 47: 10824-10831.
- Nagase, A., Dunnett, N. (2010): Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and diversity. *Landscape and Urban Planning* 97: 318-327.
- Nagase, A., Dunnett, N. (2012): Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning* 104: 356-363.
- Oke, T.R. (1997): Urban Climates and Global Environmental Change. In Thompson, R.D., Perry, A. (Hrsg.) *Applied Climatology: Principles & Practices*. New York, NY: Routledge, pp. 273-287.
- Ollinger, S.V. (2012): Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. *New Phytologist* 189: 375-394.
- Onamura, S., Matsumoto, M., Hokoi, S. (2001): Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens. *Energy and Buildings* 33: 653-666.
- Parizotto, S., Lamberts, R. (2011): Investigation of green roof thermal performance in temperature climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. *Energy and Buildings* 43: 1712-1722.
- Pitha, U., Scharf, B., Enzi, V. (2012): Comparison of laboratory and in-field water storage properties of different green roofs and gravel roof. *World Green Roof Congress Copenhagen 2012*; 15 pp.
- Rixen, C., Mulder, C.P.H. (2005): Improved water retention links high species richness with increased productivity in arctic tundra moss communities. *Oecologia* 146: 287-299.
- Rowe, D. (2011): Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution* 159: 2100-2110.
- Santamouris, M. (2012): Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy* 103: 682-703.
- Scharf, B. (2012): Beitrag zum Klimaschutz oder teure Dekoration? Dach- und Fassadengrün auf dem Prüfstand. *Garten + Landschaft* 122: 24-27.
- Scharf, B., Pitha, U., Trimmel, H. (2012): Thermal performance of green roofs. *World Green Roof Congress Copenhagen 2012 Urban Grey to Urban Green, Copenhagen, SEP 18-21, 2012*. In: *World Green Roof Congress, Urban Grey to Urban Green*, 16 pp.
- Scherba, A., Sailor, D. J., Rosenstiel, T. N., Wamser, C. C. (2011): Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment. *Building and Environment* 46: 2542-2551.
- Seidl, M., Gromaire, M.-C., Saad, M., De Gouvello, B. (2013): Effect of substrate depth and rain-event history on the pollutant abatement of green roofs. *Environmental Pollution* 183: 195-203.
- Serbin, S.P., Dillaway, D.N., Kruger, E.L., Townsend, P.A. (2011): Leaf optical properties reflect variation in photosynthetic metabolism and its sensitivity to temperature. *Journal of Experimental Botany*. doi:10.1093/jxb/err294, 14 pp.
- Simmons, M.T., Gardiner, B., Windhager, S., Tinsley, J. (2008): Green roofs are not created equal: The hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems* 11: 339-348.
- Speak, A.F., Rothwell, J.J., Lindley, S.J., Smith, C.L. (2014): Metal and nutrient dynamics on an aged intensive green roof. *Environmental Pollution* 184: 33-43.
- Stadt Heidelberg (2011): Heidelbergger Dach(g)arten – Handlungsleitfaden zur extensiven Dachbegrünung. http://heidelberg-bahnstadt.de/sites/heidelberg-bahnstadt.de/files/documents/handlungsleitfaden-zur-extensiven-dachbegrueunung_2011_09_15.pdf, abgerufen am 09.04.2014.

- Starry, O. (2013): The comparative effects of three sedum species on green roof stormwater retention. PhD Thesis. Dissertation. Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, 157 pp.
- Stock M. (Hrsg.) (2005): KLARA Klimawandel, Auswirkungen, Risiken und Anpassung. Studie im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) Baden Württemberg. PIK Report No. 99, 222 S.
- Takakura, T., Kitade, S., Goto, E. (2000): Cooling effect of greenery cover over a building. *Energy and Buildings* 31: 1–6.
- Takebayashi, H., Moriyama, M. (2007): Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment* 42: 2971–2979.
- Teemusk, A., Mander, U. (2007): Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events. *Ecological Engineering* 30: 271-277.
- Thuring, C. E., Dunnett, N (2014): Vegetation composition of old extensive green roofs (from 1980s Germany). *Ecological Processes* 3, 11 pp.
- Tröltzsch, J., Görlach, B., Lückge, H., Peter, M., Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland, *Climate Change* 10/2012, 209 S. Umweltbundesamt Berlin, <http://www.uba.de/uba-info-medien/4298.html>, abgerufen am 02.04.2014.
- Van Seters, T., Rocha, L.; Smith, D., MacMillan, G. (2009): Evaluation of green roofs for runoff retention, runoff quality, and leachability. *Water Quality Research Journal of Canada* 44: 33-47.
- VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., Rugh, C.L., Xiao, L. (2005): Watering regime and green roof substrate design affect Sedum plant growth. *HortScience* 40: 659-664.
- VDI (2001): Umweltmeteorologie. Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen. Berechnung der spektralen Bestrahlungsstärken im solaren Wellenlängenbereich. *Environmental meteorology. Interactions between atmosphere and surfaces. Calculation of spectral irradiances in the solar wavelength range.* VDI 3789 Blatt 3 / Part 3, 79 S.
- Villarreal, E.L., Bengtsson, L. (2005): Response of a Sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering* 25:1-7.
- Wicklein, H.F., Ollinger, S.V., Martin, M.E., Hollinger, D.Y., Lepine, L.C., Day, M.C., Bartlett, M.K., Richardson, A.D., Norby, R.J. (2013): Variation in foliar nitrogen and albedo in response to nitrogen fertilization and elevated CO₂. *Oecologia* 169: 915-925.
- Wilsey, B.J., Teaschner, T.B., Daneshgar, P.P., Isbell, F.I., Polley, H.W. (2009): Biodiversity maintenance mechanisms differ between native and novel exotic dominated communities. *Ecol. Lett.* 12: 432-442.
- Wittig, S., Schuchardt, B. (2013): Hitze in der Stadt – Herausforderungen und Best-practice-Beispiele. *Umwelt und Mensch Informationsdienst UMID* 1: 42-46.
- Wolf, D., Lundholm, J. (2008): Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability. *Ecological Engineering* 33: 179-186.
- Yang, J., Yu, Q., Gong, P. (2008): Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment* 42: 7266–7273.
- Yu, Y., Zhu, H., Frantz, J.M., Reding, M.E., Chan, K.C., Ozkan, H.E. (2009): Evaporation and coverage area of pesticide droplets on hairy and waxy leaves. *Biosystems Engineering* 104: 324-334.
- Zebe, H.-D. (2012): Gründach und PV: Eine sinnvolle Ergänzung. *Bauhandwerk* 34: 28-30.
- Zia, S., Wenyong, D., Spreer, W., Spohrer, K., Xiongkui, H., Müller, J. (2012): Assessing crop water stress of winter wheat by thermography under different irrigation regimes in North China Plain. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 5: 1-11.
- ZinCo (2011): Dachbegrünung erhöht Erträge der Photovoltaik. http://www.zinco.de/aktuelles/presseberichte/pressebericht_details.php?id=54, abgerufen am 02.04.2014.

Tabelle A1. Liste der in den Städten Heidelberg und Stuttgart zur Anlage von extensiven Dachbegrünungen empfohlenen Pflanzenarten. Neben den wissenschaftlichen und deutschen Namen sind auch die bevorzugte Substrathöhe, die maximale Pflanzenhöhe und die Wuchsform angegeben.

Art (wissenschaftlicher Name)	Deutscher Name bzw. Sortenname	Nennung der Art in "Stuttgarter" und/oder "Heidelberger" Liste	Substrathöhe (cm)	Pflanzenhöhe (cm)	Wuchsform
<i>Achillea millefolia</i>	Wiesenschafgarbe	S			
<i>Achillea tomentosa</i>	Teppichschafgarbe	S			
<i>Allium molv</i>	Goldlauch	S			
<i>Allium schoenoprasum</i>	Schnittlauch	S, HD	<10	22	mehrfährig
<i>Allium sphaerocephalon</i>	Kugellauch	S			
<i>Alyssum saxatile</i>	Steinkraut	S			
<i>Anthemis tinctoria</i>	Färber-Kamille	S			
<i>Anthenaria dioica</i>	Katzenpfötchen	S			
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Ruchgras	HD	<10	35	mehrfährig
<i>Aquilegia vulgaris</i>	Akelei	HD	>10	55	mehrfährig
<i>Aster linosyris</i>	Goldhaaraster	S			
<i>Campanula glomerata</i>	Knäuelglockenblume	S			
<i>Campanula persicifolia</i>	Pfirsichglockenblume	S			
<i>Campanula rapunculoides</i>	Acker Glockenblume	HD	>10	50	mehrfährig
<i>Campanula rotundifolia</i>	Rundblättrige Glockenblume	S, HD	>10	22	mehrfährig
<i>Centaurea scabiosa</i>	Scabiosen Flockenblume	S			
<i>Cerastium tomentosum</i>	Silber Hornkraut	S			
<i>Clinopodium vulgare</i>	Wirbeldost	HD	>10	45	mehrfährig
<i>Crysanthemum leucanthemum</i>	Wiesenmargerite	S, HD	>10	45	mehrfährig
<i>Cymbalaria muralis</i>	Zimbelkraut	HD	>10	22	mehrfährig
<i>Dianthus arenarius oder deltoides</i>	Sandnelke	S			
<i>Dianthus carthusianorum</i>	Karthäusernelke	S, HD	<10	30	mehrfährig
<i>Euphorbia cyparissias</i>	Zypressenwolfsmilch	S			
<i>Euphorbia myrsinitis</i>	Walzenwolfsmilch	S			
<i>Festuca ovina</i>	Schafschwengel	HD	<10	25	mehrfährig
<i>Festuca rubra</i>	Rotschwengel	HD	>10	52	mehrfährig
<i>Fragaria vesca</i>	Walderdbeere	HD	>10	12	mehrfährig
<i>Fragaria viridis</i>	Knackelbeere	S			
<i>Galium verum</i>	Echtes Labkraut	HD	>10	45	mehrfährig
<i>Geranium sanguineum</i>	Blutstorchschnabel	S			
<i>Gypsophila repens</i>	Polster Schleierkraut	S			
<i>Helianthemum nummularium</i>	Sonnenröschen	S			
<i>Hieracium murorum</i>	Waldhabichtskraut	HD	>10	40	mehrfährig
<i>Hieracium pilosella</i>	Kleines Habichtskraut	S, HD	<10	17	mehrfährig
<i>Hieracium rubrum</i>	Rotes Habichtskraut	S			
<i>Hypericum perforatum</i>	Echtes Johanniskraut	HD	>10	45	mehrfährig
<i>Iris germanica</i>	Schwertlilie	S			
<i>Iris pumila</i>	Zwergschwertlilie	S			
<i>Jovibarba sobolifera</i>	Dachwurz	S			
<i>Knautia arvensis</i>	Acker Witwenblume	HD	>10	55	mehrfährig
<i>Koeleria glauca</i>	Blaues Schillergras	S	>10	30	mehrfährig
<i>Lavandula angustifolia</i>	Lavendel	S			
<i>Linaria vulgaris</i>	Gemeines Leinkraut	HD	>10	47	mehrfährig
<i>Linum perenne</i>	Staudenlein	S			
<i>Lotus corniculatus</i>	Hornklee	HD	>10	22	mehrfährig
<i>Medicago lupulina</i>	Hopfenklee	HD	<10	37	mehrfährig
<i>Muscari comosum</i>	Perlhazinthe	S			
<i>Muscari neelectum</i>	Traubenhyazinthe	HD	>10	22	mehrfährig
<i>Nepeta faasseni</i>	Katzenminze	S			
<i>Onobrychis vicifolia</i>	Esparssette	S, HD	>10	45	mehrfährig
<i>Oriqanum vulgare</i>	Oregano	S, HD	<10	35	mehrfährig
<i>Papaver dubium</i>	Saatmohn	HD	<10	45	einjährig
<i>Papaver rhoeas</i>	Klatschmohn	HD	<10	45	einjährig
<i>Petrorrhagia saxifraga</i>	Felsennelke	S			
<i>Pimpinella saxifraga</i>	Bibernelle	HD	>10	45	mehrfährig
<i>Plantago media</i>	Mittlerer Wegerich	HD	>10	27,5	mehrfährig
<i>Poa pratensis</i>	Wiesenspengras	HD	>10	55	mehrfährig
<i>Potentilla aurea</i>	Goldfingerkraut	S			
<i>Potentilla neumanniana</i>	Frühlingsfingerkraut	S			
<i>Potentilla recta</i>	Hohes Fingerkraut	S			
<i>Prunella grandiflora</i>	Große Braunelle	S, HD	>10	20	mehrfährig
<i>Prunella vulgaris</i>	Gemeine Braunelle	HD	>10	17	mehrfährig
<i>Pulsatilla vulgaris</i>	Küchenschelle	S			
<i>Rumex acetosella</i>	Kleiner Sauerampfer	HD	>10	20	mehrfährig
<i>Salvia pratensis</i>	Wiesensalbei	S, HD	>10	45	mehrfährig
<i>Sanquisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf	HD	>10	27	mehrfährig
<i>Saponaria ocyroides</i>	Polsterseifenkraut	S			
<i>Saponaria officinalis</i>	Echtes Seifenkraut	HD	>10	55	mehrfährig
<i>Saxifraga aizoon</i>	Krusten Steinbrech	S			
<i>Saxifraga cotyledon</i>	Krusten Steinbrech	S			
<i>Scabiosa canescens</i>	Duftskabiose	S			
<i>Sedum acre</i>	Scharfer Mauerpfefter	S, HD	<10	10	mehrfährig
<i>Sedum acre "Aureum"</i>	Goldsorte	S			
<i>Sedum album</i>	Weißes Fetthenne	S, HD	<10	14	mehrfährig
<i>Sedum album "Chloroticum"</i>	Weißes Fetthenne	S			
<i>Sedum album "Coral Carpet"</i>	Coral Carpet	S			
<i>Sedum album "Desenberg"</i>	Desenberg	S			
<i>Sedum album "Laconium"</i>	Laconium	S			
<i>Sedum album "Murale"</i>	Murale	S			
<i>Sedum andrae</i>	Englisches Sedum	S			
<i>Sedum arachnoideum</i>	arachnoideum	S			
<i>Sedum caucolicum</i>	Himalaja Fetthenne	S			
<i>Sedum ellacombianum</i>	Elacomb Fetthenne	S			
<i>Sedum ewersii</i>	Himalaja Fetthenne	S			
<i>Sedum floriferum = Phedimus floriferus</i>	Weihenstephaner Gold	S	>10	20	mehrfährig
<i>Sedum hybridum "Immergrünchen"</i>	Immergrünchen	S			
<i>Sedum kamtschaticum var. ellacombianum</i>	Kamtschatka Fetthenne	S			
<i>Sedum origanum</i>	Amerikanisches Sedum	S			
<i>Sedum reflexum</i>	Trippmadam	HD	<10	22	mehrfährig
<i>Sedum rupestre</i>	Felsen Fetthenne	HD	<10	22	mehrfährig
<i>Sedum sarmentosum</i>	Goldrankensedum	S			
<i>Sedum sediforme</i>	Felsenfetthenne	S			
<i>Sedum sexanquale</i>	Milder Mauerpfefter	S			
<i>Sedum spurium</i>	Kaukasus-Asienfetthenne	S			
<i>Sedum telephium</i>	Purpur Fetthenne	HD	>10	55	mehrfährig
<i>Sempervivum hybridum</i>	Hauswurz	S			
<i>Sempervivum tectorum</i>	Echte Hauswurz	HD	<10	32	mehrfährig
<i>Silene vulgaris</i>	Aufgeblasenes Leimkraut	HD	<10	32	mehrfährig
<i>Teucrium scorodonia</i>	Salbei Gamander	HD	>10	40	mehrfährig
<i>Thymus pulegioides</i>	Feld Thymian	HD	<10	22	mehrfährig
<i>Thymus serpyllum</i>	Sand-Thymian	S	>10	20	mehrfährig
<i>Trifolium arvense</i>	Hasenklee	HD	<10	20	einjährig

Abbildung A1. Übersicht der Pflanzenentwicklung. Die Nummerierung der Zeilen gibt Kennzahlen der 15 verschiedenen Ansätze (Nr. 1- 5: Monokulturen, Nr. 6-10: 2-fach Mischungen, Nr. 11-15: 3-fach Mischungen) zusätzlich der Kontrollen (Nr. 16) wieder (vgl. Tabelle 3).

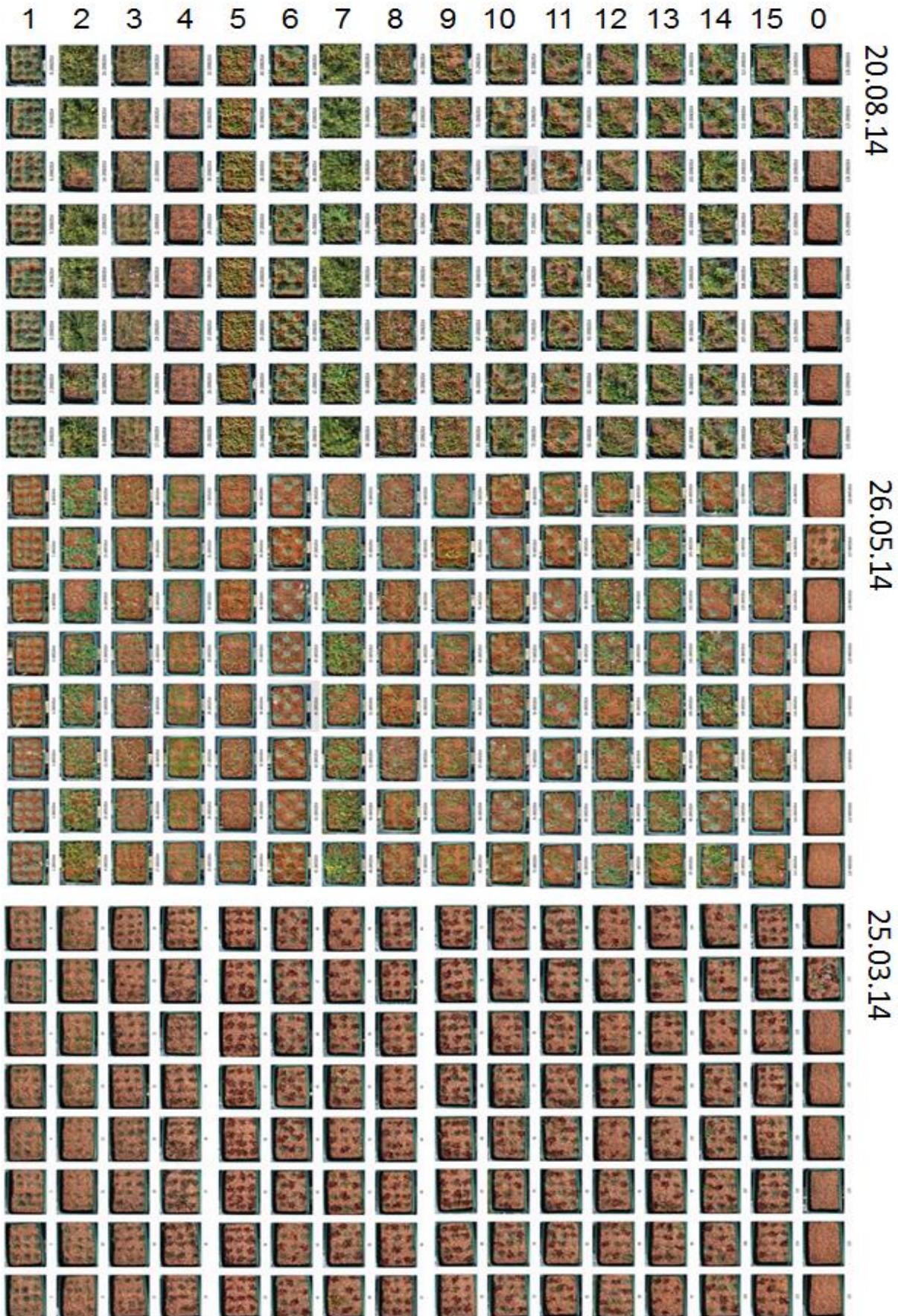


Abbildung A2. Fotos (VIS-Realbilder) der in den Austrocknungsversuchen benutzten 34 Pflanzenarten (vgl. Nr. in Tabelle 6) und der unbepflanzten Kontrolle (Nr. 0).

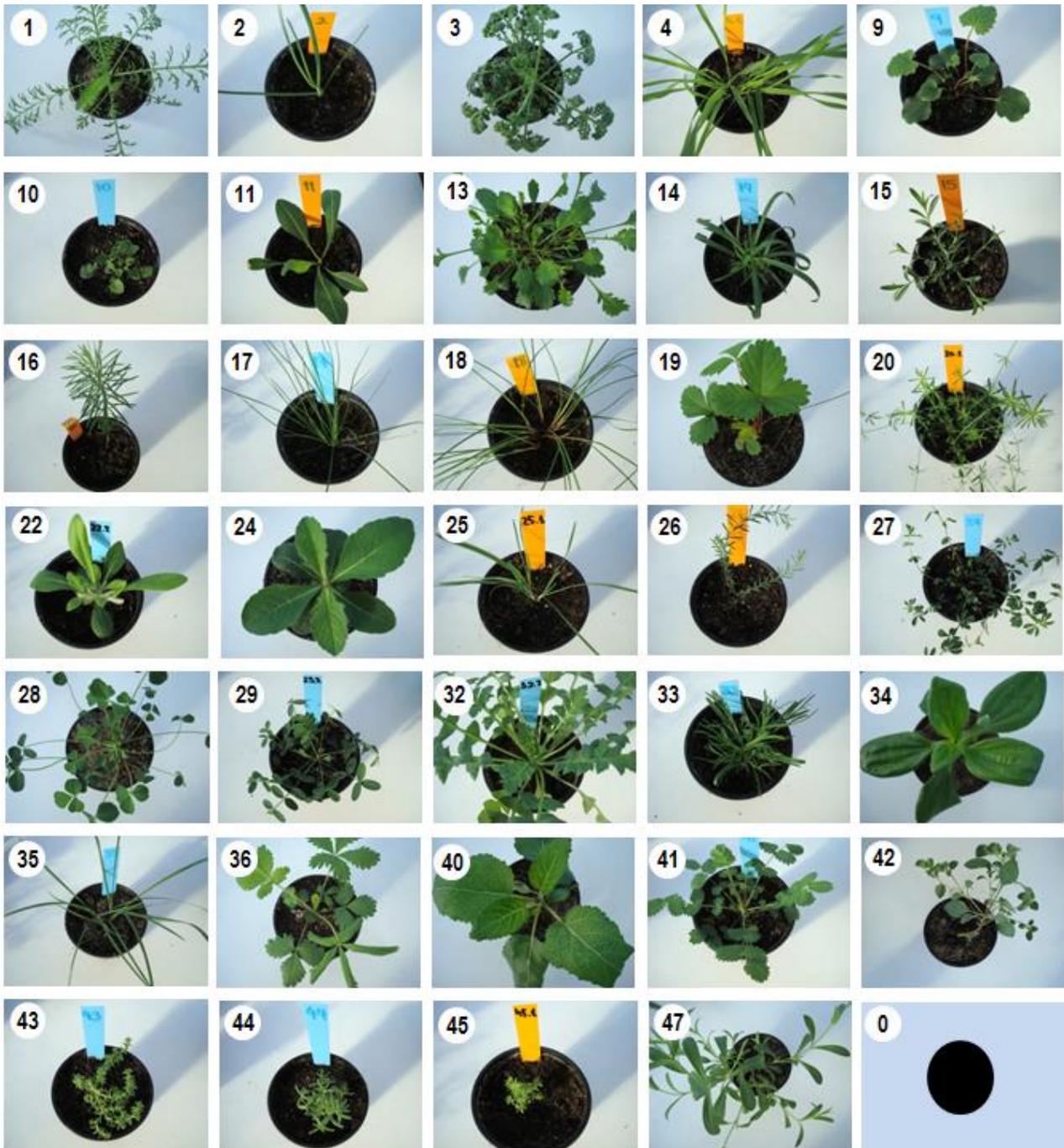


Abbildung A3. IR-Bilder der in den Austrocknungsversuchen benutzten 34 Pflanzenarten (vgl. Nr. in Tabelle 6) und der unbepflanzten Kontrolle (Nr. 0).

