



# **Optimierung der Evapotranspirations- und Kühlleistung extensiver Dachbegrünungen durch gezielte Nutzung von Grauwasser**

## **Abschlussbericht**

über das unter dem  
AZ 28577-23  
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt  
geförderte Forschungsprojekt

von

Ralf Walker und Dieter Schenk, Fa. ZinCo (Antragsteller)  
sowie  
Martin Jauch (†), Irena Krummradt, Heinz-Josef Schmitz, Dieter Lohr  
und Prof. Dr. Elke Meinken,  
Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (Kooperationspartner)

Freising im Mai 2016

Elektronische Fassung des Abschlussberichts erhältlich über:

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf  
Prof. Dr. Elke Meinken  
Am Staudengarten 14  
85350 Freising  
Tel.-Nr.: 08161/713658  
[elke.meinken@hswt.de](mailto:elke.meinken@hswt.de)

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



AZ	<b>28577/01</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	<b>120.154,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Optimierung der Evapotranspirations- und Kühlleistung extensiver Dachbegrünungen durch gezielte Nutzung von Grauwasser</b>			
<b>Stichworte</b>		Wasser, Kühlung, System, Optimierung			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>36/45 Monate</b>	<b>01.02.2012</b>	<b>31.01./31.10.2015</b>	<b>1</b>		
<b>Bewilligungsempfänger</b>	ZinCo GmbH			Tel	07022-6003360
	Lise-Meitner-Strasse 2			Fax	07022-6003361
	72622 Nürtingen			Projektleitung	
				Dieter Schenk	
			Bearbeiter		
			Ralf Walker		
<b>Kooperationspartner</b>	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf Fakultät Gartenbau und Lebensmitteltechnologie Prof. Dr. Elke Meinken, Martin Jauch (†) 85350 Freising				

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

Dachbegrünungen können als "biologische Klimaanlage" zur Verbesserung des thermischen Milieus in Stadtgebieten beitragen, wobei - neben der Wärmeabsorption - der Kühleffekt der Grünflächen durch Verdunstung von Wasser in den Vordergrund rückt. Extensive Dachbegrünungen, die mit rund 85 % am weitesten verbreitete Begrünungsart, werden bislang allerdings meist als Trockenstandorte konzipiert, deren Evapotranspirationsleistung bei trocken-heißer Witterung als gering einzustufen ist. Soll von extensiven Dachbegrünungen bei Hitzeeinwirkung eine spürbare klimatische Wirkung ausgehen, sind eine ergänzende Bewässerung und eine angepasste Vegetationsform unumgänglich. Im Sinne eines ressourcenschonenden Wassermanagements sollte dabei möglichst auf die Verwendung von Trinkwasser verzichtet werden. Eine alternative, kontinuierlich fließende und witterungsunabhängige Quelle für die Wasserversorgung von Dachbegrünungen könnte sich mit Grauwasser aus Haushalten erschließen.

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

Ausgangspunkt der Untersuchungen war die Ermittlung der Qualität von Grauwässern, also der Abwässer aus Bad (Dusche, Badewanne sowie Handwaschbecken) und Waschmaschine. Da diese vor allem von der Beschaffenheit der darin enthaltenen Handelsprodukte abhängt, wurden 51 Hygieneartikel, Waschmittel und Waschmaschinenzusätze hinsichtlich pflanzenbaulich und umweltökologisch relevanter Parameter untersucht. Anschließend erfolgte die Analyse diverser Grauwässer aus der Praxis, deren Untersuchungswerte den Qualitätsanforderungen für Gießwasser gegenübergestellt wurden.

Im zweiten Teil des Vorhabens wurden die Auswirkungen von Grauwassergaben auf die Entwicklung unterschiedlich salzverträglicher und pH-toleranter Gräser und Kräuter (insgesamt 43 Arten) zunächst unter Gewächshausbedingungen erfasst. Ziel dabei war es, diejenigen Pflanzenarten zu ermitteln, die sich als gut grauwasserverträglich und gleichzeitig transpirationsstark erwiesen. Letzteres wurde bei 23 Pflanzenarten auch unter extremen Klimabedingungen in einer Tageslichtkammer überprüft.

In weiteren Untersuchungen wurden elf der nach den oben genannten Kriterien ausgewählten Pflanzenarten unterschiedlich kombiniert zur Begrünung verschiedenartig aufgebauter und mit Grauwasser bewässerter extensiver Dachbegrünungsmodule im Vergleich zu herkömmlichen *Sedum*-Bepflanzungen getestet. Dabei wurden die Begrünungen sowohl im Freiland als auch im Gewächshaus und in Tageslichtkammern ausgeführt, um sie unterschiedlichen Klimabedingungen auszusetzen. Neben den Auswirkungen der variierten Bedingungen auf die Entwicklung der Vegetation wurde vor allem die Evapotranspiration der unterschiedlichen Module erfasst.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Die Analyse der Hygieneartikel ergab eine meist geringe Belastung mit möglicherweise pflanzenschädigenden Stoffen. Auch von Grauwässern aus der Praxis wurden die Qualitätsanforderungen, die an Gießwässer gestellt werden, fast immer eingehalten. Als am stärksten belastet, vor allem mit Natrium, Salz und Tensiden, erwies sich Grauwasser aus der Waschmaschine, weshalb dieses in den Pflanzenversuchen eingesetzt wurde.

Von den im ersten Pflanzenversuch geprüften 43 Kräuter- und Gräserarten reagierten unter Gewächshausbedingungen nur acht mit signifikant schlechterem Wachstum bei Verwendung von Grauwasser im Vergleich zu Leitungswasser. Die Evapotranspiration der Pflanzen wurde durch Erfassen des Wasserverbrauchs ermittelt, der je nach Pflanzenart stark variierte (während der 48-wöchigen Versuchszeit zwischen 12,0 und 22,8 l/Topf). Dabei hatte die Verwendung von Grauwasser keinen wesentlichen Einfluss auf die Verdunstung.

In weiteren Pflanzenversuchen mit drei unterschiedlichen Kombinationen von elf gut grauwaserverträglichen und transpirationsstarken Kräuter- und Gräserarten im Vergleich zu einer *Sedum*-Begrünung ergaben sich große Unterschiede zwischen den Modulen. Die Kräuter/Gräser-Mischungen verdunsteten im Gewächshaus bei Verwendung von Grauwasser im ersten Sommer bis 3,3 l/m<sup>2</sup>·T sowie im zweiten Sommer 2,4 bis 4,7 l/m<sup>2</sup>·T und damit 25 bis 75 % (erstes Jahr) bzw. 75 bis 150 % (zweites Jahr) mehr als die *Sedum*-Varianten. Bei Verwendung von Leitungswasser lag die Evapotranspiration zwar meist um 10-20 % höher im Vergleich zu Grauwasser, trotzdem kann der ökologisch weitaus sinnvollere Einsatz von Grauwasser empfohlen werden. In Tageslichtkammern unter extremeren Klimabedingungen bestätigten sich die im Gewächshaus erzielten Verdunstungswerte weitgehend.

Die höchste Evapotranspiration wurde im dritten Vegetationsjahr an vier heißen Augusttagen im Freiland bei Bewässerung mit Leitungswasser erzielt. Hier verdunsteten die Kräuter/Gräser-Mischungen durchschnittlich 7,5 l/m<sup>2</sup>·T im Vergleich zu 5,7 l/m<sup>2</sup>·T in den *Sedum*-Parzellen.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Jauch, M., Meinken, E., Lakatos, I., Krummradt, I.: Aus Grau wird Grün - Bewässerung extensiver Dachbegrünungen mit Grauwasser. Poster auf dem Tag der Forschung und Gärten an der Forschungsanstalt für Gartenbau Weißenstephan, Freising 16.06.2012

Jauch, M., Meinken, E., Krummradt, I.: Evapotranspirationmessungen der Stauden und Gräser. Poster auf der Mitgliederversammlung der Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzen e.V., Freising 19.11.2013

Jauch, M., Walker, R.: Aus Grau wird Grün – Bewässerung extensiver Dachbegrünungen mit Grauwasser. Vortrag auf dem 12. Internationalen FBB-Gründachsymposium in Ditzingen, 13.02. 2014.

Jauch, M.; Krummradt, I.; Meinken, E.: Nutzung von Grauwasser zur Bewässerung extensiver Dachbegrünungen. 49. Jahrestagung der Deutschen Gartenbauwissenschaftlichen Gesellschaft und des Bundesverbandes der Hochschulabsolventen/Ingenieure Gartenbau und Landschaftsarchitektur e.V. vom 05. - 08. März 2014 in Dresden, Poster und Kurzfassung (BHGL-Schriftenreihe Band 30, S.72, 2014)

Jauch, M.: Aus Grau wird Grün. Dach + Grün, 23, Nr.2, S.11-15, 2014

## **Fazit**

Der Eintrag pflanzenschädigender Stoffe mit Reinigungs- und Waschmitteln ist meist nur gering, sodass die Qualität des Leitungswassers nicht übermäßig verschlechtert wird. Grauwässer aus Bad und Waschmaschine sind damit prinzipiell zur Bewässerung extensiver Dachbegrünungen geeignet, soweit die Leitungswasserqualität nicht einer pflanzenbaulichen Verwendung entgegensteht. Durch die Nutzung von Grauwasser ist daher eine kontinuierliche, ressourcenschonende Wasserversorgung großflächiger extensiver Dachbegrünungen möglich. Diese können folglich nicht nur wie bisher üblich als Trockenstandort mit *Sedum*-Begrünung konzipiert, sondern mit ökologisch wertvolleren und verdunstungsstärkeren Kräuter/Gräser-Mischungen bepflanzt werden. Solche verdunstungsmaximierten Gründächer erbringen bei trocken-heißer Witterung eine höhere Kühlleistung und können zur Verbesserung des Stadtklimas beitragen.

## Zusammenfassung

Dachbegrünungen können als "biologische Klimaanlage" einen Beitrag zur Verbesserung des Stadtklimas leisten, wobei v.a. der Kühleffekt durch Verdunstung von Wasser im Vordergrund steht. Dabei ist eine spürbare klimatische Wirkung nur zu erzielen, wenn bisher lediglich als Trockenstandorte mit *Sedum*-Begrünungen konzipierte extensive Dachbegrünungen ergänzend bewässert und angepasst bepflanzt werden. In einem dreijährigen Forschungsvorhaben wurde daher der Einsatz von ressourcenschonendem Grauwasser zur Bewässerung von unterschiedlich bepflanzten extensiven Dachbegrünungen gegliedert in drei Abschnitte untersucht:

- Von Grauwässern aus der Praxis wurden die an Gießwässer gestellten Qualitätsanforderungen fast immer eingehalten. In Grauwässern enthaltene Hygieneartikel waren meist nur gering, Waschmittel etwas höher mit pflanzenschädigenden Stoffen belastet. Trotzdem sind Grauwässer aus Bad und Waschmaschine zur Bewässerung extensiver Dachbegrünungen geeignet, sofern die Leitungswasserqualität einer pflanzenbaulichen Verwendung nicht entgegensteht.

- Von den im ersten Pflanzenversuch im Gewächshaus geprüften 43 Gräser- und Kräuterarten reagierten nur acht mit signifikant schlechterem Wachstum bei Verwendung von Grauwasser im Vergleich zu Leitungswasser. Die Evapotranspirationsleistung der Pflanzenarten variierte stark (während der 48-wöchigen Versuchszeit zwischen 12,0 und 22,8 l/Pflanze). Sie war bei Verwendung von Grauwasser gegenüber Leitungswasser nicht nennenswert reduziert.

- In weiteren Pflanzenversuchen mit drei unterschiedlichen Kombinationen von elf gut grauwasserverträglichen und transpirationsstarken Kräuter- und Gräserarten im Vergleich zu einer *Sedum*-Begrünung ergaben sich große Unterschiede zwischen den Modulen. Die Kräuter/Gräser-Mischungen verdunsteten im Gewächshaus bei Verwendung von Grauwasser im ersten Sommer bis 3,3 l/m<sup>2</sup>·T sowie im zweiten Sommer 2,4 bis 4,7 l/m<sup>2</sup>·T und damit 25 bis 75 % (erstes Jahr) bzw. 75 bis 150 % (zweites Jahr) mehr als die *Sedum*-Varianten. Bei Verwendung von Leitungswasser lag die Evapotranspiration zwar meist um 10-20 % höher im Vergleich zu Grauwasser, trotzdem kann der ökologisch weitaus sinnvollere Einsatz von Grauwasser empfohlen werden. In Tageslichtkammern mit extremeren Klimabedingungen bestätigten sich die im Gewächshaus erzielten Verdunstungswerte weitgehend.

Durch die Nutzung von Grauwasser ist somit eine kontinuierliche, ressourcenschonende Wasserversorgung großflächiger extensiver Dachbegrünungen mit ökologisch wertvollen und verdunstungsstarken Kräuter/Gräser-Mischungen möglich. Solche verdunstungsmaximierten Gründächer erbringen bei trocken-heißer Witterung eine deutliche Kühlleistung und können damit zur Verbesserung des Stadtklimas beitragen.

In weiteren Untersuchungen sollten die hier geprüften Module mit Kräuter/Gräser-Mischungen unter Praxisbedingungen getestet werden. Neben technischen Fragen, z.B. bezüglich einer intelligenten, witterungsabhängigen Bewässerungssteuerung oder zu Pflegemaßnahmen, sollte dabei die ermittelte Kühlleistung validiert sowie das Wasserrückhaltevermögen und die ökologische Wertigkeit (z.B. bezüglich der Biodiversität von Insekten) genauer ermittelt werden.

Das Forschungsvorhaben wurde von der Firma ZinCo GmbH in Kooperation mit der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf durchgeführt und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen AZ 28577-23 gefördert.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Projektkennblatt</b> .....	<b>3</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>6</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>8</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>12</b>
<b>2 Qualität von Grauwasser</b> .....	<b>14</b>
2.1 Inhaltsstoffe der in Grauwässern enthaltenen Handelsprodukte.....	14
2.1.1 Waschmittel, Waschmaschinenzusätze und Abflussreiniger.....	14
2.1.2 Hygieneartikel.....	15
2.1.3 Fazit.....	17
2.2 Inhaltsstoffe haushaltsüblicher Grauwässer.....	17
2.2.1 Grauwässer ohne Waschmaschinen-Abwasser.....	17
2.2.2 Grauwässer aus der Waschmaschine.....	19
2.2.3 Fazit.....	20
2.3 Konsequenzen für die Herstellung der Grauwässer für die Vegetationsversuche.....	20
<b>3 Verträglichkeit verschiedener Kräuter und Gräser gegenüber Grauwasser und deren Transpirationsleistung</b> .....	<b>22</b>
3.1 Angaben zum Versuch.....	22
3.1.1 Pflanzenauswahl.....	22
3.1.2 Versuchsdurchführung.....	22
3.2 Versuchsergebnisse.....	24
3.2.1 Schadsymptome an den Pflanzen.....	24
3.2.2 Substratanalysen und Auswaschung.....	25
3.2.3 Frischmasse der Pflanzen.....	28
3.2.4 Evapotranspiration bei Bepflanzung mit unterschiedlichen Pflanzenarten.....	29
3.2.4.1 Messungen im Gewächshaus.....	29
3.2.4.2 Messungen in der Tageslichtkammer.....	30
3.3 Fazit.....	30
<b>4 Vegetationsversuche mit Kräuter/Gräser-Mischungen im Vergleich zu herkömmlichen <i>Sedum</i>-Bepflanzungen unter Verwendung von Grauwasser...</b>	<b>31</b>
4.1 Gewächshaus und Tageslichtkammer.....	31
4.1.1 Angaben zum Versuch.....	31
4.1.2 Ergebnisse.....	33
4.1.2.1 Evapotranspiration - Messung im Gewächshaus.....	33
4.1.2.2 Evapotranspiration - Messung in der Tageslichtkammer.....	36
4.1.2.3 Fazit der Evapotranspirationmessungen.....	37
4.1.2.4 Temperaturen im Substrat - Messung in der Tageslichtkammer.....	38
4.1.2.5 Pflanzenwachstum und Inhaltsstoffe der Pflanzen bei Kultur im Gewächshaus.....	40
4.2 Freiland.....	41
4.2.1 Angaben zum Versuch.....	41
4.2.2 Ergebnisse.....	43
4.2.2.1 Menge und Qualität des Drainwassers.....	43
4.2.2.2 Pflanzenwachstum.....	44
4.2.2.3 Verdunstungsmessung.....	45

4.2.2.4	Pflegeaufwand.....	45
<b>5</b>	<b>Bewertung der Ergebnisse.....</b>	<b>47</b>
5.1	Ökologische Bewertung.....	47
5.2	Ökonomische Bewertung.....	49
5.3	Fazit und Ausblick.....	52
<b>6</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>56</b>
7.1	Berechnungen zur Dosierung der Waschmittelmenge für die Versuchsgrauwässer.....	56
7.2	Angaben zu den Pflanzenversuchen.....	57
7.2.1	Erster Pflanzenversuch.....	57
7.2.2	Zweiter Pflanzenversuch.....	59
7.2.2.1	Gewächshaus/Tageslichtkammer.....	59
7.2.2.2	Freiland.....	64
7.3	Grundlagen der ökonomischen Betrachtung.....	67
7.3.1	Systemaufbau einer klassischen als Trockenstandort konzipierten extensiven Dachbegrünung.....	67
7.3.2	Systemaufbau einer neuartigen verdunstungsmaximierten extensiven Dachbegrünung mit einer Gräser-Kräutervegetation.....	68
7.3.3	Grundlagen der Kalkulation.....	70
7.3.3.1	Materialkosten für die Installation von Dachbegrünungssystemen.....	70
7.3.3.2	Arbeitsaufwand für Installation und Pflege bei Gründächern.....	71
7.3.3.3	Installations- und Instandsetzungskosten für ein Cool Roof.....	72

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1:	Pflanzen zwei [A] bzw. vier [B-F] Monate nach Versuchsbeginn, jeweils links LW und rechts GW; [A]: <i>Geranium palustre</i> , [B]: <i>Geranium x pratense</i> , [C]: <i>Briza media</i> , [D]: <i>Sanguisorba officinalis</i> , [E]: <i>Carex grayi</i> , [F]: <i>Polemonium caeruleum</i> .....	24
Abb. 3.2:	Frischmasse der Pflanzenarten am Versuchsende (KW 26/13), bei denen sich signifikante Unterschiede zwischen den Bewässerungsarten ergaben .....	28
Abb. 3.3:	Evapotranspiration ausgewählter Pflanzenarten während 22-tägiger Kultur in einer Tageslichtkammer unter extremen Temperaturbedingungen .....	30
Abb. 4.1:	Kunststoffschalen im Gewächshaus zu Versuchsbeginn (KW 27/13) .....	31
Abb. 4.2:	Pflanzmodule 1-5 (siehe Tab. 4.1) kultiviert im Gewächshaus, links in KW 35/13 (acht Wochen nach Versuchsbeginn) und rechts am Versuchsende in KW 40/14 .....	32
Abb. 4.3:	Links: Pflanzmodule in der Tageslichtkammer in KW 38/13; rechts: Trockenstresssymptome an <i>Sedum acre</i> nach vier Wochen Trockenheit .....	33
Abb. 4.4:	Mittlere Verdunstungsraten der unterschiedlichen Pflanzmodule im Gewächshaus bei Verwendung von Grauwasser im Vergleich zur Standardverdunstung FAO 56 im Freiland (Standort Freising) .....	34
Abb. 4.5:	Mittlere Verdunstungsraten der unterschiedlichen Pflanzmodule im Gewächshaus bei Verwendung von Leitungswasser im Vergleich zur Standardverdunstung FAO 56 im Freiland (Standort Freising) .....	34
Abb. 4.6:	Mittlere tägliche Verdunstungsraten der dreimal wöchentlich mit Leitungswasser gegossenen Pflanzmodule in der Tageslichtkammer .....	37
Abb. 4.7:	Relative Verdunstung verschiedener <i>Sedum</i> -Begrünungen in Tageslichtkammern in Abhängigkeit von der Bewässerung .....	37
Abb. 4.8:	Temperaturverlauf in der Raumluft und im Substrat des Pflanzmoduls 80K/20G (= SG1, 18.9.-29.10.2013) .....	39
Abb. 4.9:	Temperaturverlauf in der Raumluft und im Substrat des Pflanzmoduls 50K/50G (= SG2, 18.9.-29.10.2013) .....	39
Abb. 4.10:	Temperaturverlauf in der Raumluft und im Substrat des Pflanzmoduls 20K/80G (= SG3, 18.9.-29.10.2013) .....	39
Abb. 4.11:	Temperaturverlauf in der Raumluft und im Substrat des unbewässerten Pflanzmoduls S.-Mix (= SD 1, 18.9.-29.10.2013) .....	39
Abb. 4.12:	Temperaturverlauf in der Raumluft und im Substrat des unbewässerten Pflanzmoduls S.'WG' (= SD 2, 18.9. - 29.10.2013) .....	39
Abb. 4.13:	Temperaturverlauf in der Raumluft und im Substrat des unbewässerten Moduls OV (18.9. - 29.10.2013) .....	39
Abb. 4.14:	Pflanzentrockenmasse am Versuchsende bei Verwendung unterschiedlicher Gießwässer sowie in den verschiedenen Pflanzmodulen .....	40
Abb. 4.15:	Freiland-Versuchsflächen des zweiten Pflanzenversuchs kurz nach Versuchsbeginn .....	42
Abb. 4.16:	Pflanzmodule 1-5 (s. Tab. 4.6) in KW 30/14 (= zehn Wochen vor Versuchsende) .....	42
Abb. 4.17:	Verdunstung in den verschiedenen Pflanzmodulen im August 2015 im Freiland im Vergleich zur Standardverdunstung FAO 56 (Standort Freising) .....	45
Abb. 4.18:	Pflegeaufwand der unterschiedlichen Pflanzmodule .....	46
Abb. 5.1:	Kalkulierte Evapotranspiration ( $ET_k$ ) einer unbewässerten <i>Sedum</i> -Begrünung (oB), die Differenzen der $ET_k$ einer <i>Sedum</i> -Begrünung mit und ohne Bewässerung (Diff $ET_k$ <i>Sedum</i> mB-oB) sowie die Differenzen der $ET_k$ einer Kräuter/Gäser-Vegetation und einer <i>Sedum</i> -Begrünung jeweils mit Bewässerung (Diff $ET_k$ K/G mB - <i>Sedum</i> mB) am Standort Freising für das Jahr 2015 .....	48
Abb. 7.1:	Körnungslinie des im ersten Pflanzenversuch verwendeten Substrates .....	58
Abb. 7.2:	Körnungslinie des im zweiten Pflanzenversuch verwendeten Substrates .....	61



Abb. 7.3: Standardsystemaufbau extensive Dachbegrünung mit <i>Sedum</i> -Vegetation.....	67
Abb. 7.4: Empfohlener neuer Systemaufbau „Verdunstungsmaximiertes extensives Gründach“ mit Kräuter/Gräser-Vegetation .....	68

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Analysenergebnisse Waschmittel, Waschmaschinenzusätze und Abflussreiniger .....	15
Tab. 2.2:	Analysenergebnisse Hygieneartikel (Mittelwerte).....	16
Tab. 2.3:	Analysenergebnisse von Grau- und entsprechenden Leitungswässern aus sechs Haushalten sowie Grenzwerte für Gießwässer .....	18
Tab. 2.4:	Analysenergebnisse der Grauwässer aus zwei Haushalten an jeweils sieben aufeinander folgenden Tagen und der entsprechenden Leitungswässer .....	19
Tab. 2.5:	Analysenergebnisse von drei Waschmittel-Grauwässern und des entsprechenden Leitungswassers im Vergleich zu Grenzwerten für Gießwässer.....	20
Tab. 2.6:	Analysenergebnisse der zu unterschiedlichen Zeitpunkten angesetzten Versuchsgrauwässer (GW) und des entsprechenden Leitungswassers (LW) im Vergleich zu Grenzwerten für Gießwässer.....	21
Tab. 3.1:	Pflanzenarten im Versuch „Verträglichkeit verschiedener Kräuter und Gräser gegenüber Grauwasser und deren Transpirationsleistung“ .....	23
Tab. 3.2:	Pflanzenarten mit deutlichen Schadsymptomen und Ausfällen zu Versuchsende (KW 18/13).....	25
Tab. 3.3:	Substratanalysen <sup>1)</sup> in KW 42/12 nach den beiden Auswaschungen in KW 31 und 39/12 .....	26
Tab. 3.4:	Substratanalysen <sup>1)</sup> am Versuchsende (KW 22/13) .....	26
Tab. 3.5:	Na-Gehalte im gebrochenen und im unebrochenen Substrat am Versuchsende.....	26
Tab. 3.6:	Erste Auswaschung in der Grauwasser-Variante GW+AU: pH-Wert und Leitfähigkeit des Dränwassers und damit ausgetragene im Vergleich zu den bis dahin eingetragenen Stoffmengen (in KW 31/12, sechs Wochen nach Versuchsbeginn) .....	27
Tab. 3.7:	Zweite Auswaschung in der Grauwasser-Variante GW+AU: pH-Wert und Leitfähigkeit des Dränwassers und damit ausgetragene Stoffmengen (in KW 37/12, zwölf Wochen nach Versuchsbeginn).....	27
Tab. 3.8:	Wasserverbrauch der getesteten Gräserarten, gemittelt über die drei Bewässerungsarten.....	29
Tab. 3.9:	Wasserverbrauch (WV) der getesteten Kräuterarten (l/Topf), gemittelt über die drei Bewässerungsarten.....	29
Tab. 3.10:	Wasserverbrauch der Pflanzenarten bei unterschiedlicher Bewässerung, gemittelt über die Pflanzenarten.....	30
Tab. 4.1:	Versuchsplan "Vegetationsversuch mit Kräuter/Gräser-Mischungen im Vergleich zu herkömmlichen <i>Sedum</i> -Bepflanzungen unter Verwendung von Grauwasser - Gewächshaus" .....	33
Tab. 4.2:	Relative Evapotranspiration/Evaporation in der Woche vom 16.-22.7.2014 mit hoher Einstrahlung* gegenüber dem Mittel der drei Wochen vor- und nachher (in %) .....	35
Tab. 4.3:	Analyse des gebrochenen Substrates am Versuchsende .....	36
Tab. 4.4:	Im Substrat der unterschiedlichen Pflanzmodule aufgezeichnete Temperaturen (C°)38	
Tab. 4.5:	Na-, Zn-, B- und Al-Gehalte der Pflanzen-Trockensubstanzen am Versuchsende.....	41
Tab. 4.6:	Versuchsplan "Vegetationsversuch mit Kräuter/Gräser-Mischungen im Vergleich zu herkömmlichen <i>Sedum</i> -Bepflanzungen unter Verwendung von Grauwasser - Freiland" .....	43
Tab. 4.7:	Mengen an Niederschlag, Bewässerung und Dränwasser im Freilandversuch .....	43
Tab. 4.8:	Qualität des Drainwassers hinsichtlich pflanzenphysiologischer oder umweltrelevanter Parameter bei Einsatz unterschiedlicher Gießwässer und Systemaufbauten.....	44
Tab. 7.1:	Wasserverbrauch von Waschmaschinen für einen vollen Waschgang laut Herstellerangaben .....	56

Tab. 7.2: Waschmittel-Dosierempfehlungen der Hersteller.....	56
Tab. 7.3: Angaben zum Anteil der Waschmaschinen-Abwässer am gesamten nutzbaren Haushalts-Grauwasser* .....	57
Tab. 7.4: Versuchsplan „Verträglichkeit verschiedener Kräuter und Gräser gegenüber Grauwasser und deren Transpirationsleistung“ .....	57
Tab. 7.5: Analysenergebnisse des für den ersten Pflanzenversuch verwendeten Substrats und die Anforderungen an Vegetationssubstrate für Extensivbegrünungen nach FLL.....	58
Tab. 7.6: Aufbau der Pflanzmodule im "Vegetationsversuch mit Kräuter/Gräser-Mischungen im Vergleich zu herkömmlichen <i>Sedum</i> -Bepflanzungen unter Verwendung von Grauwasser - Gewächshaus/Tageslichtkammer" .....	59
Tab. 7.7: Angaben zum Versuch " Vegetationsversuch mit Kräuter/Gräser-Mischungen im Vergleich zu herkömmlichen <i>Sedum</i> -Bepflanzungen unter Verwendung von Grauwasser - Gewächshaus" .....	60
Tab. 7.8: Analysenergebnisse des für den zweiten Pflanzenversuch verwendeten Substrats und die Anforderungen an Vegetationssubstrate für Extensivbegrünungen nach FLL.....	61
Tab. 7.9: Sollwerte der Parameter in der Tageslichtkammer - zweiter Pflanzenversuch von KW 38/13 bis KW 43/13 .....	62
Tab. 7.10: Nährstoffgehalte der Pflanzen-Trockensubstanzen der Grauwasser-Varianten 1-5 am Versuchsende.....	62
Tab. 7.11: Nährstoffgehalte der Pflanzen-Trockensubstanzen der Leitungswasser-Varianten 8-12 am Versuchsende.....	63
Tab. 7.12: Angaben zum Versuch " Vegetationsversuch mit Kräuter/Gräser-Mischungen im Vergleich zu herkömmlichen <i>Sedum</i> -Bepflanzungen unter Verwendung von Grauwasser - Freiland" .....	64
Tab. 7.13: Aufbau der Pflanzmodule - Freiland.....	65
Tab. 7.14: Qualität des Drainwassers hinsichtlich pflanzenphysiologischer oder umweltrelevanter Parameter bei Einsatz unterschiedlicher Gießwässer und Systemaufbauten (Drainwasserentnahmen v. 1.7.14 und 15.7.14*) .....	66
Tab. 7.15: Vorgehensweise bei der Verdunstungsmessung im Freiland beim zweiten Pflanzenversuch.....	66
Tab. 7.16: Materialkosten (Listenpreise in €/m <sup>2</sup> , Stand 12/2015) anhand eines fiktiven Daches mit 1000 m <sup>2</sup> (Grundriss 50 x 20 m, keine Dachdurchdringungen) .....	70
Tab. 7.17 Arbeitszeitbedarf (min/m <sup>2</sup> ) für die Installation der Begrünungssysteme anhand eines fiktiven Daches mit 1000 m <sup>2</sup> , Grundriss 50 x 20 m, keine Dachdurchdringungen (Verlege- und Pflanzzeiten basierend auf Erfahrungswerten der Fa. ZinCo).....	71
Tab. 7.18: Arbeitszeitbedarf (min/m <sup>2</sup> ) für die jährliche Pflege .....	71
Tab. 7.19: Arbeits- und Materialkosten für die Instandsetzung eines Cool Roofs (Angaben basieren auf Angaben von ausführenden Betrieben und Erfahrungen der Fa. ZinCo). 72	72

# 1 Einleitung

Dachbegrünungen können das thermische Milieu von Stadtgebieten verbessern und somit Teil der Anpassungsstrategie an zu erwartende Klimaveränderungen sein [Sch09a, Sch09b]. Zur Minderung der städtischen Wärmelast steht hier - neben der Wärmeabsorption - v.a. die adiabate Kühlung durch die Grünflächen im Vordergrund, bei der der Umgebungsluft durch die Verdunstung von Wasser Energie und damit Wärme entzogen wird.

Die mit rund 85 % am weitesten verbreitete Begrünungsart, die extensive Dachbegrünung, wird bislang jedoch meist als Trockenstandort definiert und konzipiert [Häm05]. Sie gründet auf dünnen, wasserdurchlässigen Substratschichten, auf denen vorwiegend trockenresistente Pflanzenarten gedeihen. Ausschließlich gespeist durch Niederschlagswasser ist bei dieser Art der Dachbegrünung somit nur eine stark schwankende, v.a. bei trocken-heißer Witterung relativ geringe Evapotranspirationsleistung zu erwarten [KS09]. Soll von extensiven Dachbegrünungen auch bei Hitze einwirkung eine stärkere klimatische Wirkung ausgehen, ist eine ergänzende Bewässerung unumgänglich.

Im Sinne eines ressourcenschonenden Wassermanagements sollte dabei allerdings weitestgehend auf die Verwendung von Trinkwasser verzichtet werden [Bun08]. Hilfreich wäre eine kontinuierlich fließende, witterungsunabhängige Quelle für die Wasserversorgung der Dachbegrünungen. Hier bieten sich Grauwässer an, d.h. häusliche Abwässer ohne Fäkalien und hochbelastetes Küchenwasser, die vor dem Einsatz mikrobiologisch aufbereitet und hygienisiert wurden (und somit der EU-Badegewässerrichtlinie entsprechen [Eur06]). Bisher wird Grauwasser hierzulande kaum, in wasserarmen Zonen wie z.B. Australien und den USA jedoch schon seit längerem erfolgreich zur Bewässerung von Grünflächen eingesetzt. Erste Forschungen zur Sammlung, Aufbereitung und nutzbringenden Verwendung von Grauwasser in Deutschland sind vielversprechend [FBR05, FBR09 und GW05]. Es gibt aber auch Hinweise auf mögliche Probleme der Grauwasser Verwendung aufgrund seiner chemischen Beschaffenheit, insbesondere im Hinblick auf Salzgehalt und Alkalität [EPA04, Aus02, RK06, Fra05, Tho09, PG10]. Gezielt untersucht wurde die Nutzung von Grauwasser aus privaten Haushalten zur Bewässerung von extensiven Dachbegrünungen bislang noch nicht.

Dabei kann bereits bei einer Sukkulenten-Begrünung durch ausreichende Bewässerung bei trocken-heißer Witterung die Evapotranspirationsrate von  $0,35 \text{ l/m}^2 \cdot \text{T}$  auf  $2,67 \text{ l/m}^2 \cdot \text{T}$  erhöht und dadurch - bezogen auf  $100 \text{ m}^2$  begrünte Dachfläche - eine zusätzliche Kühlenergie von rund  $160 \text{ kWh}$  generiert werden [Rez05]. Eine weitere Steigerung auf bis zu  $10 \text{ l/m}^2 \cdot \text{T}$  (annähernd  $700 \text{ kWh}/100 \text{ m}^2$ ) ist bei Verwendung von Pflanzen mit höherer Verdunstungsleistung zu erwarten [KT02, Dür95, Har08].

Als Nebeneffekt kann sich der Wärmeentzug bei einer Kombination von Dachbegrünungen und Photovoltaikanlage positiv auf den Wirkungsgrad der PV-Module auswirken, deren Leistung um ca.  $0,5 \%$  pro  $^{\circ}\text{C}$  Aufheizung sinkt.

Im Rahmen dieses dreijährigen Forschungsprojekts wurden daher die Möglichkeiten der Verwendung von Grauwasser aus privaten Haushalten als Zusatzbewässerung bei extensiven Dachbegrünungen unter variierten Klimabedingungen geprüft. Dabei sollte das Evapotranspirationspotenzial von extensiven Dachbegrünungen systematisch genutzt und optimiert werden, um auch bei trocken-heißer Witterung zu einer möglichst hohen Kühlleistung der Begrünungs-

flächen zu kommen. Zudem wurde geprüft, inwieweit sich die biologische Wertigkeit extensiver Dachbegrünungen durch den Einsatz artenreicherer Vegetationen erhöhen lässt. Wurden bei extensiven Begrünungen bisher fast ausschließlich xeromorphe und sukkulente Pflanzen (v.a. verschiedene *Sedum*-Arten) verwendet [FLL96, Ans10], die als Anpassung an edaphische und klimatische Trockenheit ihre Transpiration stark reduzieren können, ermöglicht die zusätzliche Bewässerung den Einsatz anderer Pflanzenarten mit höheren Verdunstungspotentialen. Die Pflanzenauswahl wurde daher auf Meso- und Hygrophyten erweitert, also auf Pflanzen, die an frische bzw. feuchte Standorte angepasst sind.

Das Vorhaben war in drei Arbeitsschritte untergliedert. Zunächst wurden die Inhaltsstoffe der in Grauwässern enthaltenen Handelsprodukte sowie die haushaltsüblicher Grauwässer ermittelt, um mit durchschnittlich belasteten Grauwässern in die Pflanzenversuche gehen zu können. Im Anschluss daran wurden 43 für Dachbegrünungen in Frage kommende Pflanzenarten auf ihre Grauwasserverträglichkeit und ihr Transpirationspotential hin untersucht. Mit den am besten verträglichen und transpirationsstärksten Pflanzenarten erfolgten dann weitere umfangreiche Vegetationsversuche. Darin wurden die ausgewählten Pflanzenarten unterschiedlich kombiniert herkömmlichen *Sedum*-Pflanzungen gegenübergestellt, um herauszufinden, ob die neuen Gräser/Kräuter-Mischungen wirklich den bisher gängigen Extensivbegrünungen mit *Sedum* hinsichtlich der Verdunstungsleistung überlegen sind.

## 2 Qualität von Grauwasser

Ausgangspunkt der Untersuchungen dieses Forschungsprojekts war die Ermittlung der Qualität von Grauwässern, also der Abwässer aus Bad (Dusche, Badewanne und Handwaschbecken) und Waschmaschine. Da diese vor allem von der Beschaffenheit der darin enthaltenen Handelsprodukte abhängt, wurde zunächst eine Auswahl verschiedener Hygieneartikel, Waschmittel, Waschmaschinenzusätze und Abflussreiniger hinsichtlich pflanzenbaulich und umweltökologisch relevanter Parameter untersucht. Anschließend erfolgte die Analyse diverser Grauwässer aus der Praxis.

### 2.1 Inhaltsstoffe der in Grauwässern enthaltenen Handelsprodukte

Es wurden insgesamt 51 Handelsprodukte auf ihre Inhaltsstoffe hin analysiert. Darunter waren 13 Waschmittel, drei Waschmaschinenzusätze, ein Abflussreiniger und 34 Hygieneartikel. Für die Analyse wurden jeweils 0,25 g des Produkts in 250 ml vollentsalztem Wasser gelöst.

#### 2.1.1 Waschmittel, Waschmaschinenzusätze und Abflussreiniger

Die Waschmittel und Waschmaschinenzusätze sowie der Abflussreiniger wiesen häufig Gehalte in der gleichen Größenordnung auf (Tab. 2.1). Die Leitfähigkeit (und damit der Salzgehalt) lag in allen drei Produkten, besonders im Abflussreiniger, relativ hoch, wobei ein wesentlicher Anteil der Leitfähigkeit auf die vergleichsweise hohen Gehalte an Natrium und beim Abflussreiniger zusätzlich auf diejenigen an Chlorid zurückzuführen ist. Die Pflanzennährstoffe  $\text{NH}_4^-$  und  $\text{NO}_3^-$ -N, P, K, Mg und Ca waren nur in sehr geringen, lediglich Schwefel in nennenswerten Mengen (bis zu 84 mg/g in Waschmitteln) enthalten. Auch die Schwermetallgehalte bewegten sich unter oder nur geringfügig über der Nachweisgrenze. Lediglich Blei kam in etwas höheren, aber sicherlich nicht pflanzenschädigenden Konzentrationen vor. Von den weiteren Inhaltsstoffen fielen besonders die sehr hohen Gehalte an Aluminium mit bis zu rund 28.000  $\mu\text{g/g}$  auf. Außerdem lagen die Werte an anionischen und nichtionischen Tensiden vor allem bei Waschmitteln in einem hohen Bereich (bis zu 17.100 mg MBAS/g bzw. 8.700 mg TritonX/g). Darüber hinaus waren die Gehalte an Bor bei Waschmitteln sowie die Gehalte an Zink bei Waschmaschinenzusätzen auffällig.

Das Aluminium in Waschmitteln entstammt den zur Wasserenthärtung zugesetzten Zeolithen. Laut Wagner [Wag10] bezeichnet man als Zeolithe "Natriumaluminiumsilikate unterschiedlicher Zusammensetzung mit der allgemeinen Formel  $\text{Na}_x\text{Al}_y\text{SiO}_2$ ". Darin sind "die Ionen des Siliciums, Aluminiums und Sauerstoffs ortsfest im Kristallgitter eingebunden". In den Hohlräumen dieses Gitters sind die Natrium-Ionen frei beweglich und in wässriger Lösung z.B. gegen die härtebildenden Ca-Ionen in äquivalenten Mengen austauschbar, wodurch hartes Wasser weicher wird. Das Aluminium jedoch geht nicht in Lösung und ist somit auch nicht pflanzenverfügbar und -schädlich. Analytisch wird es nur erfasst, weil die Kristallgitterstruktur während der Messung zerstört wird. Pflanzenbaulich sind die gemessenen Aluminiumgehalte als nicht relevant einzustufen.

**Tab. 2.1: Analysenergebnisse Waschmittel, Waschmaschinenzusätze und Abflussreiniger**

Parameter*	Waschmittel (n = 13)		Waschmaschinenzusätze (n = 3)		Abflussreiniger (n = 1)
	MW**	MAX**	MW	MAX	
pH-Wert	8,7	10,0	6,9	9,2	11,7
LF (25 °C, µS/cm)	389	889	316	485	2.800
Salz (mg/g)	206	469	166	256	1.455
NH <sub>4</sub> -N (mg/g)	0,2	0,4	0,2	0,2	0,5
NO <sub>3</sub> -N (mg/g)	0,6	0,8	0,6	0,7	28
P (mg/g)	1,3	4,3	0,9	2,7	≤ 0,01 <sup>1)</sup>
K (mg/g)	0,7	4,1	-	≤ 0,25 <sup>1)</sup>	≤ 0,25
Mg (mg/g)	≤ 0,25 <sup>1)</sup>	0,36	-	≤ 0,25 <sup>1)</sup>	≤ 0,25
Na (mg/g)	113	306	87	140	446
Cl (mg/g)	2,8	8,1	0,4	0,4	213
S (mg/g)	28,1	84,3	18	51	8,3
Fe (µg/g)	20	49	18	27	30
Cu (µg/g)	≤ 1,25 <sup>1)</sup>	22	-	≤ 1,25	≤ 1,25
Mn (µg/g)	3	28	0,2	0,4	6
Zn (µg/g)	9	61	181	538	3
KS <sub>4,3</sub> (mmol/l)	2,8	9	1	2	12
KH (°dH)	0	0	0	0	0
GH (°dH)	0	0	0	0	0
B (µg/g)	357	1528	12	25	13
Ag (µg/g)	11	56	6	10	≤ 5 <sup>1)</sup>
Al (µg/g)	4.704	27.954	7.222	21.632	20.201
As (µg/g)	≤ 5 <sup>1)</sup>	9	-	≤ 5	≤ 5
Cd (µg/g)	≤ 0,5 <sup>1)</sup>	0,8	-	≤ 0,5	≤ 0,5
Cr (µg/g)	≤ 0,5 <sup>1)</sup>	1	-	≤ 0,5	≤ 0,5
Pb (µg/g)	21	77	24	61	≤ 5 <sup>1)</sup>
Se (µg/g)	7	13	6	8	≤ 5 <sup>1)</sup>
Tl (µg/g)	-	≤ 2 <sup>1)</sup>	-	≤ 2	2,9
V (µg/g)	≤ 2,5 <sup>1)</sup>	5	-	≤ 2,5	≤ 2,5
anion. Tenside (mg MBAS/g)	9.909	17.065	1.106	3.150	40
kation. Tenside (mg CTAB/g)	181	560	64	171	≤ 10 <sup>1)</sup>
nichtion. Tens. (mg TritonX/g)	3.538	8.659	625	1.341	43

\*Die Gehalte an Calcium, Fluor, Cobalt, Beryllium, Quecksilber, Barium und Nickel lagen in allen Produkten durchgängig unter der Nachweisgrenze; ergaben sich nur einzelne Werte unter der Nachweisgrenze, ging bei der Mittelwertbildung die Nachweisgrenze in die Berechnung ein

\*\* MW = Mittelwert, MAX = Maximalwert <sup>1)</sup> Nachweisgrenze

## 2.1.2 Hygieneartikel

Auch die 34 untersuchten Hygieneartikel enthielten nur geringe Mengen an Pflanzennährstoffen und Schwermetallen (Tab. 2.2). Lediglich die Zn-Gehalte von Shampoos und v. a. von Zahncremes lagen im Mittel höher, wobei dies jeweils auf ein Produkt mit hohen Gehalten zurückzuführen ist. Zudem konnte nur in Zahncremes Fluor nachgewiesen werden. Salz war ebenso wie die weiteren Inhaltsstoffe (Na, Cl, Al) nur in geringen Mengen enthalten. Ähnlich wie bei den Waschmitteln ergaben sich auch bei den Hygieneartikeln zum Teil vergleichsweise hohe Analysenwerte hinsichtlich anionischer und nichtionischer Tenside.

**Tab. 2.2: Analysergebnisse Hygieneartikel (Mittelwerte)**

Parameter*	Dusch- gel (n = 9)	Sham- poo (n = 9)	Bad- reiniger (n = 6)	Haar- spülung (n = 3)	Bade- zusatz (n = 2)	Zahn- creme (n = 2)	Seife (n = 2)	Rasier- gel (n = 1)
pH-Wert	5,8	5,4	4,4	5,0	5,6	8,0	5,4	8,3
LF (25 °C, µS/cm)	46	58	89	12	48	49	65	7,1
Salz (mg/g)	23	30	47	6,2	24	25	33	3,6
NH <sub>4</sub> -N (mg/g)	0,2	0,2	0,6	0,5	0,6	0,5	0,3	0,6
NO <sub>3</sub> -N (mg/g)	0,7	0,7	0,7	0,3	0,2	0,3	0,4	0,3
P (mg/g)	0,03	0,02	0,01	0,02	0,06	1,4	0,03	0,02
K (mg/g)	0,4	0,6	≤ 0,25 <sup>1)</sup>	≤ 0,25	0,5	0,6	0,3	≤ 0,25
Mg (mg/g)	≤ 0,25 <sup>1)</sup>	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,25	0,3	≤ 0,25	≤ 0,25
Ca (mg/g)	≤ 0,25 <sup>1)</sup>	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,25	9,8	≤ 0,25	≤ 0,25
Na (mg/g)	11	13	6,2	1,2	12	7,6	13,7	≤ 0,25 <sup>1)</sup>
Cl (mg/g)	3,7	7	5,2	0,6	3,8	0,7	13,4	0,3
S (mg/g)	8,1	10	5,0	≤ 0,03 <sup>1)</sup>	11,8	3,1	6	≤ 0,03
Fe (µg/g)	≤ 5 <sup>1)</sup>	≤ 5	6	6	≤ 5	14	≤ 5	≤ 5
Cu (µg/g)	2	≤ 1,25 <sup>1)</sup>	≤ 1,25	≤ 1,25	≤ 1,25	≤ 1,25	≤ 1,2 <sup>1)</sup>	≤ 1,25
Mn (µg/g)	0,2	0,3	0,5	0,1	≤ 0,08 <sup>1)</sup>	1	≤ 0,08	≤ 0,08
Zn (µg/g)	5	399	2	3	2	1.202	17	2
B (µg/g)	≤ 5 <sup>1)</sup>	6	≤ 5	≤ 5	≤ 5	7	≤ 5	≤ 5
KS <sub>4,3</sub> (mmol/l)	0	0	0	0,7	0,5	1,3	0	0,7
KH (°dH)	0	0	0	0	0	1,6	0	0
GH (°dH)	0	0	0	0	0	1,6	0	0
Al (µg/g)	≤ 10 <sup>1)</sup>	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	17	≤ 10	≤ 10
Cd (µg/g)	≤ 0,5 <sup>1)</sup>	0,6	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Co (µg/g)	≤ 2,5 <sup>1)</sup>	≤ 2,5	≤ 2,5	≤ 2,5	≤ 2,5	4	≤ 2,5	≤ 2,5
Cr (µg/g)	≤ 0,5 <sup>1)</sup>	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	0,6	≤ 0,5	≤ 0,5
Pb (µg/g)	≤ 5 <sup>1)</sup>	15	≤ 5	7	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
anionische Tenside (mg MBAS/g)	5.503	6.754	750	39	9.632	2.031	5.496	161
kationische Tenside (mg CTAB/g)	353	175	454	1.153	≤ 10 <sup>1)</sup>	≤ 10	141	363
nichtion. Tenside (mg TritonX/g)	743	892	1.411	1.444	1.026	≤ 10 <sup>1)</sup>	383	164

\* Die Gehalte an Silber, Arsen, Selen, Beryllium, Quecksilber, Nickel, Thallium, Barium und Vanadium lagen in allen Produkten durchgängig unter der Nachweisgrenze; Fluor konnte lediglich in Zahncremes nachgewiesen werden (0,34 bzw. 1,39 mg/g); ergaben sich nur einzelne Werte unter der Nachweisgrenze, ging bei der Mittelwertbildung die Nachweisgrenze in die Berechnung ein

<sup>1)</sup> Nachweisgrenze



### **2.1.3 Fazit**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Hygieneartikel in der Regel nur geringe Belastungen mit möglicherweise pflanzenschädigenden Stoffen aufweisen. Vereinzelt hohe Gehalte sind als unproblematisch anzusehen. Zum einen benötigt man pro Anwendung nur eine geringe Menge des Hygieneprodukts und zum anderen wird diese geringe Menge im Abwasser, beispielsweise beim Duschen oder Baden, stark verdünnt. Auch relativ hoch konzentriert eingesetzte Produkte wie z.B. Abflussreiniger lassen keine Probleme erwarten. Sie unterliegen auf Grund des seltenen Einsatzes einer starken Verdünnung, da Grauwässer nicht unmittelbar nach der Entstehung zum Gießen von Pflanzenbeständen genutzt werden.

Demgegenüber könnten in Waschmitteln und Waschmaschinenzusätzen die grundsätzlich hohen Gehalte an Na, Salz und Tensiden sowie die zum Teil hohen Gehalte an B und Zn bedenklich sein, da Waschmaschinenabwässer in der Praxis einen beachtlichen Anteil am Grauwasser ausmachen.

## **2.2 Inhaltsstoffe haushaltsüblicher Grauwässer**

Nach der Analyse der in Grauwässern enthaltenen Handelsprodukte wurden praxisübliche Grauwässer ohne Waschmaschinen-Abwasser aus verschiedenen Haushalten untersucht. Dabei besaßen alle beprobten Haushalte eine Grauwasser-Aufbereitungsanlage, die die leicht abbaubaren organischen Verbindungen aus Hautfett sowie Haut- und Haarbestandteilen herausfilterte. Würde auf diese Filterung verzichtet, käme es zu Fäulnisprozessen in den Wässern und in der Folge zu unerwünschten Geruchsentwicklungen [FBR05]. Darüber hinaus wurden Grauwässer aus der Waschmaschine separat analysiert.

### **2.2.1 Grauwässer ohne Waschmaschinen-Abwasser**

Die meist geringen Gehalte an Inhaltsstoffen in Hygieneartikeln spiegelten sich in niedrigen Gehalten der Abwässer aus Bade- und Duschwanne sowie Handwaschbecken von sechs verschiedenen Haushalten wider (Tab. 2.3).

Bei fast allen Parametern lagen die Analysenwerte der Grauwässer nur geringfügig höher als die der Leitungswässer. Lediglich vereinzelt kam es zu stärkeren Anhebungen. Diese dürften aber in keinem Fall eine Pflanzenschädigung bei Verwendung der Wässer zum Gießen nach sich ziehen, da die einschlägigen Grenzwerte für Gießwässer weitestgehend eingehalten werden.

**Tab. 2.3: Analysenergebnisse von Grau- und entsprechenden Leitungswässern aus sechs Haushalten sowie Grenzwerte für Gießwässer**

Parameter*	Grauwasser			Grenzwerte <sup>2)</sup>	Leitungswasser		
	MW**	MIN**	MAX**		MW	MIN	MAX
pH-Wert	7,7	7,1	8,1	-	7,9	7,8	8,0
LF (25 °C, µS/cm)	662	539	755	700	483	298	682
Salz (mg/l)	350	285	399	-	255	157	360
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	0,4	0,3	0,7	-	0,3	0,3	0,4
NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	7,1	3,0	11,6	11	2,6	2,3	2,9
P (mg/l)	0,7	0,1	1,1	-	0,1	≤ 0,01 <sup>1)</sup>	0,2
K (mg/l)	5,8	5,2	8,4	-	3,5	2,8	4,3
Mg (mg/l)	10,9	9,7	11,5	-	9,1	6,9	11,3
Ca (mg/l)	77	61	87	-	57	29	85
Na (mg/l)	38,4	28,9	50,0	150	25,4	15,6	37,7
Cl (mg/l)	63,7	44,6	80,4	200	46,6	29,5	70,1
S (mg/l)	27	22	33	-	15	9	23
Fe (µg/l)	≤ 5 <sup>1)</sup>	-	6	1000	-	-	≤ 5
Cu (µg/l)	68	24	161	-	187	6	574
Mn (µg/l)	2	≤ 0,075 <sup>1)</sup>	7	100	-	-	≤ 0,075
Zn (µg/l)	93	61	124	500	51	2	74
B (µg/l)	72	56	83	500	45	43	57
KS <sub>4,3</sub> (mmol/l)	3	2	4	-	3	1	4
KH (°dH)	8,7	5,0	10,0	15	7,8	4,0	12,0
GH (°dH)	13,2	11	15	20	10,0	5,6	14,4
Ba (µg/l)	45	36	51	-	35	16	53
Pb (µg/l)	12	7	15	-	8	5	18
Se (µg/l)	12	8	16	-	8	≤ 5 <sup>1)</sup>	13

\* Die Gehalte an Fluor, Thallium, Vanadium, Chrom, Cobalt, Cadmium, Arsen, Aluminium, Silber, Beryllium, Quecksilber, Nickel und Tensiden lagen in allen Wässern durchgängig unter der Nachweisgrenze; ergaben sich nur einzelne Werte unter der Nachweisgrenze, ging bei der Mittelwertbildung die Nachweisgrenze in die Berechnung ein

\*\* MW = Mittelwerte, MIN bzw. MAX = Minimal- bzw. Maximalwerte

<sup>1)</sup> Nachweisgrenze

<sup>2)</sup> für Gießwässer nach Grantzau [Gra00], Meinken [Mei16] und Bettin [Bet10]

Da es sich bei der Grauwasserqualität der sechs Haushalte infolge einmaliger Probenahme nur um eine Momentaufnahme handelte, wurden zwei weitere Haushalte eine Woche lang täglich beprobt. Hier lagen die Analysenwerte im Mittel in gleich niedriger Größenordnung wie bei den anderen einmalig beprobten Haushalten. Zudem schwankten sie an den sieben Tagen meist nur gering, wie an der jeweils kleinen Spanne zwischen dem Minimal- und dem Maximalwert zu sehen ist (Tab. 2.4). Größere Abweichungen zwischen den Tageswerten traten nur vereinzelt auf (bei Mn, Al und Ba in Haushalt 7), doch selbst die Spitzenwerte dürften keine Pflanzschäden hervorrufen.

**Tab. 2.4: Analysenergebnisse der Grauwässer aus zwei Haushalten an jeweils sieben aufeinander folgenden Tagen und der entsprechenden Leitungswässer**

Parameter*	Haushalt 7				Haushalt 8			
	MW**	MIN**	MAX**	LW**	MW	MIN	MAX	LW
pH-Wert	8,0	7,7	8,1	8,2	8,3	8,2	8,4	8,1
LF (25 °C, µS/cm)	596	584	610	554	553	548	556	539
Salz (mg/l)	315	308	322	293	2+92	289	294	285
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	1,5	0,6	2,1	0,3	-	-	≤ 0,1 <sup>1)</sup>	≤ 0,1
NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	-	-	≤ 0,1 <sup>1)</sup>	0,5	1,5	1,1	1,9	≤ 0,1
P (mg/l)	0,7	0,1	1,4	≤ 0,01 <sup>1)</sup>	0,2	0,1	0,3	≤ 0,01
K (mg/l)	2,7	1,6	3,2	1,0	2,0	1,7	2,2	1,0
Mg (mg/l)	25	25	25	22	31	31	31	31
Ca (mg/l)	57	56	59	51	71	71	71	70
Na (mg/l)	52	50	53	38	9,9	8,9	11	7,3
Cl (mg/l)	16	15	17	13	2,9	2,0	3,3	1,4
F (mg/l)	0,2	0,2	0,2	≤ 0,1 <sup>1)</sup>	≤ 0,1	-	0,2	≤ 0,1
S (mg/l)	15	14	16	14	5,5	5,2	5,8	4,9
Cu (µg/l)	46	40	58	25	24	17	40	8
Mn (µg/l)	5	≤ 0,08 <sup>1)</sup>	16	≤ 0,08	≤ 0,08	-	1	≤ 0,08
Zn (µg/l)	69	57	97	34	103	93	127	23
B (µg/l)	58	52	60	52	7	5	8	4
KS <sub>4.3</sub> (mmol/l)	6	5	6	5	6	6	6	6
KH (°dH)	14	14	14	12	17	17	17	17
GH (°dH)	14	14	14	12	17	17	17	17
Al (µg/l)	16	≤ 10 <sup>1)</sup>	54	≤ 10	-	-	≤ 10	≤ 10
Ba (µg/l)	169	64	436	166	155	149	166	155
Pb (µg/l)	10	8	13	13	12	11	13	11
anion. Ten. (mg MBAS/l)	0,2	≤ 0,1 <sup>1)</sup>	0,7	≤ 0,1	-	-	≤ 0,1	≤ 0,1
kation. Ten. (mg CTAB/l)	0,1	≤ 0,1 <sup>1)</sup>	0,1	≤ 0,1	-	-	≤ 0,1	≤ 0,1
nichtion. T. (mg TritonX/l)	0,8	≤ 0,1 <sup>1)</sup>	3,1	≤ 0,1	0,9	0,2	1,5	≤ 0,1

\* Die Gehalte an Thallium, Vanadium, Chrom, Cobalt, Cadmium, Arsen, Silber, Eisen, Beryllium, Quecksilber, Nickel und Selen lagen in allen Wässern durchgängig unter der Nachweisgrenze; ergaben sich nur einzelne Werte unter der Nachweisgrenze, ging bei der Mittelwertbildung die Nachweisgrenze in die Berechnung ein

\*\* MW = Mittel-, MIN bzw. MAX = Minimal- bzw. Maximalwerte, LW = Leitungswasser

<sup>1)</sup> Nachweisgrenze

## 2.2.2 Grauwässer aus der Waschmaschine

Zur Analyse von Grauwässern aus der Waschmaschine wurden drei verschiedene Waschmittel in jeweils einem Waschmaschinenangang eingesetzt. Dabei erfolgte die Dosierung der Waschmittel entsprechend den Herstellerangaben (für normal verschmutzte Wäsche und die Härte des verwendeten Freisinger Leitungswassers (17 °dH)). Besonders die Grauwässer mit Color-Waschmitteln wiesen im Vergleich zum Leitungswasser stark erhöhte Werte bezüglich pH, Leitfähigkeit/Salz, Na, Al und nichtionischen Tensiden auf (Tab. 2.5). Außerdem lagen die P- und S-Gehalte gegenüber Leitungswasser höher. Das Grauwasser mit dem Wollwaschmittel nahm bei allen genannten Parametern eine Mittelstellung zwischen den Grauwässern mit Color-Waschmittel und dem Leitungswasser ein. In allen Grauwässern waren darüber hinaus die Gehalte an N, K sowie den Spurenelementen Fe, Cu, Mn und Zn leicht erhöht. Nur bei den anionischen Tensiden bewirkte das Wollwaschmittel eine stärkere Anhebung als die Color-Waschmittel.

**Tab. 2.5: Analysenergebnisse von drei Waschmittel-Grauwässern und des entsprechenden Leitungswassers im Vergleich zu Grenzwerten für Gießwässer**

Parameter*	Waschmittel 1 (color)	Waschmittel 2 (color)	Waschmittel 3 (Wolle)	Mittelwerte	Leitungswasser	Grenzwerte-Gießw. <sup>2)</sup>
pH-Wert	10,0	9,2	8,1	<b>9,1</b>	7,5	-
LF (25 °C, $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	3.180	1.710	827	<b>1906</b>	689	700
Salz (mg/l)	1679	903	437	<b>1006</b>	364	-
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	1,0	1,0	1,0	<b>1,0</b>	0,1	-
NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	3,9	4,3	4,6	<b>4,3</b>	3,6	11
P (mg/l)	11	11	1,0	<b>7,8</b>	0,0	-
K (mg/l)	19	7	17	<b>14,4</b>	2,7	-
Mg (mg/l)	31	31	30	<b>30,7</b>	28	-
Ca (mg/l)	81	78	89	<b>83</b>	90	-
Na (mg/l)	719	710	103	<b>511</b>	28	150
Cl (mg/l)	41	51	43	<b>45</b>	24	200
S (mg/l)	84	81	27	<b>64</b>	11	-
Fe ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	225	157	139	<b>174</b>	$\leq 5^{1)}$	1000
Cu ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	215	50	56	<b>107</b>	5	-
Mn ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	11	10	10	<b>10</b>	1	100
Zn ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	535	167	313	<b>338</b>	53	500
B ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	51	45	37	<b>44</b>	34	500
KS <sub>4,3</sub> (mmol/l)	20	18	7,5	<b>15</b>	6,4	-
KH (°dH)	19	18	19	<b>19</b>	18	15
GH (°dH)	19	18	19	<b>19</b>	19	20
Al ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	22.380	22.130	2.591	<b>15.700</b>	$\leq 10^{1)}$	-
Pb ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	$\leq 5^{1)}$	5,2	$\leq 5^{1)}$	<b>5</b>	6	-
anion. Tens. (mg MBAS/l)	260	108	425	<b>264</b>	$\leq 0,1^{1)}$	-
kation. Tens. (mg CTAB/l)	$\leq 0,1^{1)}$	0,5	2,8	<b>1,1</b>	$\leq 0,1$	-
nichtion. Ten. (mg TritonX/l)	45	75	11	<b>43,7</b>	$\leq 0,1^{1)}$	-

\* Die Gehalte an Thallium, Vanadium, Chrom, Cobalt, Cadmium, Barium, Arsen, Silber, Fluor, Beryllium, Quecksilber, Nickel und Selen lagen in allen Wässern durchgängig unter der Nachweisgrenze; ergaben sich nur einzelne Werte unter der Nachweisgrenze, ging bei der Mittelwertbildung die Nachweisgrenze in die Berechnung ein

<sup>1)</sup> Nachweisgrenze

<sup>2)</sup> nach Grantzau [Gra00], Meinken [Mei16] und Bettin[Bet10]

### 2.2.3 Fazit

Die durchgeführten Analysen bestätigen Literaturangaben [FBR05], wonach Grauwässer aus Dusche und Badewanne nur gering belastet sind und eine zusätzliche Verwendung des Grauwassers aus der Waschmaschine eine starke Konzentrationserhöhung vieler Inhaltsstoffe zur Folge hat.

## 2.3 Konsequenzen für die Herstellung der Grauwässer für die Vegetationsversuche

Da sich die Grauwässer aus der Waschmaschine als am stärksten belastet herausstellten, bildeten sie die Basis für die nachfolgenden Pflanzenversuche. Die Herstellung der Versuchsgrauwässer erfolgte mit einer Mischung aus sechs Waschmitteln auf der im Anhang näher beschriebenen Berechnungsgrundlage (siehe unter 7.1) in einer Konzentration von 0,5 g Wasch-

mittel/Liter Wasser. Dazu wurden aus den 13 untersuchten Waschmitteln diejenigen ausgewählt, die die höchsten Na- und B-Gehalte aufwiesen.

Da Grauwässer in der Praxis (und deshalb auch in den Versuchen) zu 27 % aus Waschmaschinenabwässern bestehen, lagen die Analysenwerte der Versuchsgrauwässer (Tab. 2.6) i.d.R. entsprechend niedriger als die der reinen Waschmaschinen-Abwässer. Im Vergleich zum Leitungswasser waren v.a. die Gehalte an Salz, Na, Zn, B und Al erhöht. Trotzdem hielten die Versuchsgrauwässer die meisten Grenzwerte für Gießwässer ein. Lediglich die Leitfähigkeit (und damit der Salzgehalt) und die Karbonathärte lagen etwas über dem Grenzwert. Außerdem enthielten die Versuchsgrauwässer hohe Mengen an Tensiden.

**Tab. 2.6: Analyseergebnisse der zu unterschiedlichen Zeitpunkten angesetzten Versuchsgrauwässer (GW) und des entsprechenden Leitungswassers (LW) im Vergleich zu Grenzwerten für Gießwässer**

Parameter*	Versuchsgrauwässer (n = 5)	Grenzwerte Gießwasser <sup>2)</sup>	Leitungswasser (n = 1)
pH- Wert	<b>8,4</b>	-	7,9
LF (25 °C, µS/cm)	<b>919</b>	700	684
Salz (g/l)	<b>0,5</b>	-	0,36
NH4-N (mg/l)	<b>0,5</b>	-	0
NO3-N (mg/l)	<b>3,6</b>	11	3
P (mg/l)	<b>0,6</b>	-	2
K (mg/l)	<b>3,2</b>	-	3
Mg (mg/l)	<b>26</b>	-	29
Ca (mg/l)	<b>72</b>	-	90
Na (mg/l)	<b>115</b>	150	33
Cl (mg/l)	<b>7</b>	200	23
S (mg/l)	<b>34</b>	-	11
Fe (µg/l)	<b>11</b>	1.000	≤ 5
Cu (µg/l)	<b>7</b>	-	6
Mn (µg/l)	<b>0,8</b>	100	3
Zn (µg/l)	<b>218</b>	500	117
B (µg/l)	<b>129</b>	500	39
KH (°dH)	<b>18</b>	15	18
GH (°dH)	<b>16</b>	20	19
Al (µg/l)	<b>321</b>	-	60
Ba (µg/l)	<b>21</b>	-	164
Pb (µg/l)	<b>14</b>	-	≤ 5
Se (µg/l)	<b>14</b>	-	7
anion. Tenside (mg MBAS/l)	<b>55 (n = 1)</b>	-	≤ 0,1 <sup>1)</sup>
nichtion. Te. (mg TritonX/l)	<b>13 (n = 1)</b>	-	≤ 0,1 <sup>1)</sup>

\* Die Gehalte an Arsen, Silber, Thallium, Vanadium, Chrom, Cobalt, Cadmium, Beryllium, Quecksilber, Nickel und Fluor lagen in allen Wässern durchgängig unter der Nachweisgrenze; ergaben sich nur einzelne Werte unter der Nachweisgrenze, ging bei der Mittelwertbildung die Nachweisgrenze in die Berechnung ein

<sup>1)</sup> Nachweisgrenze

<sup>2)</sup> für Gießwässer nach Grantzau [Gra00], Meinken [Mei16] und Bettin[Bet10]

### **3 Verträglichkeit verschiedener Kräuter und Gräser gegenüber Grauwasser und deren Transpirationsleistung**

Im zweiten Teil der Untersuchungen wurden die Auswirkungen von Grauwassergaben auf die Entwicklung unterschiedlich salzverträglicher und pH-toleranter Pflanzenarten für die Dachbegrünung erfasst. Ziel dabei war, diejenigen Arten zu ermitteln, die das Gießen mit Grauwasser gut vertragen und gleichzeitig eine hohe Transpirationsleistung aufweisen.

#### **3.1 Angaben zum Versuch**

Im Test waren 43 verschiedene Pflanzenarten, die zum einen mit Grauwasser (GW) und zum anderen mit Leitungswasser (LW) gegossen wurden (Versuchsplan siehe Tab. 7.4 im Anhang). In einer weiteren Grauwasser-Variante (GW+AU) erfolgten zwei Auswaschungen (Simulation von Regenschauern). Alle Pflanzen wurden 48 Wochen lang im ZinCo-Substrat "Sedumteppich" im 2,5-l-Container kultiviert. Die chemischen Eigenschaften und die Korngrößenverteilung des Substrats entsprachen den FLL-Richtlinien [FLL96] für extensive Dachbegrünungssubstrate (Tab. 7.5 und Abb. 7.1). Lediglich der pH-Wert lag über dem Richtwert.

##### **3.1.1 Pflanzenauswahl**

Extensive Dachbegrünungen mit geringen Substratschichten wurden bisher fast ausschließlich als Trockenstandorte konzipiert. Dementsprechend bestanden die Pflanzengesellschaften im Wesentlichen aus verschiedenen *Sedum*-Arten, die als Anpassung an häufige Trockenheit ihre Transpiration stark reduzieren können. Aufgrund der vorgesehenen Bewässerung wurde die Pflanzenauswahl auf Pflanzen erweitert, die an frische bzw. feuchte Standorte angepasst sind. Durch deren vermutlich höheres Verdunstungspotential, müsste sich die Evapotranspiration deutlich steigern lassen. Tab. 3.1 sind die geprüften 43 Pflanzenarten - Kräuter und Gräser - zu entnehmen.

##### **3.1.2 Versuchsdurchführung**

Der Versuch fand im Gewächshaus und in Tageslichtkammern statt. Im Gewächshaus erfolgte täglich die Kontrolle des Feuchtezustands des Substrats und die Pflanzen wurden bei Bedarf mit 250 ml des entsprechenden Gießwassers pro Topf gegossen. Die Töpfe standen in Untersetzern, so dass kein Wasser wegfließen konnte. Durch die Erfassung der Gießhäufigkeit ließ sich der Wasserverbrauch errechnen und daraus die Evapotranspiration ableiten.

Sechs und zwölf Wochen nach Versuchsbeginn (Anfang August und Ende September) erfolgte in der Variante GW+AU eine Auswaschung mit jeweils einem Liter vollentsalztem Wasser/Topf (entspricht 0,4 l Wasser/l Substrat). Zum ersten Auswaschungstermin waren ungefähr 20 % des insgesamt während des Versuchs verabreichten Grauwassers (im Mittel über alle Pflanzenarten 3,3 l/Topf) ausgebracht und zum zweiten Termin ungefähr 50 %.

**Tab. 3.1: Pflanzenarten im Versuch „Verträglichkeit verschiedener Kräuter und Gräser gegenüber Grauwasser und deren Transpirationsleistung“**

Nr.	Gattung*	Art	Nr.	Gattung	Art
1	<i>Veronica</i>	<i>gentianoides</i>	23	<i>Crambe</i>	<i>cordifolia</i>
2	<i>Hemerocallis</i>	<i>minor</i>	24	<i>Briza</i>	<i>media</i>
3	<i>Leucanthemum</i>	<i>vulgare</i>	25	<i>Geum</i>	<i>rivale</i>
4	<i>Geranium</i>	<i>palustre</i>	26	<i>Sanguisorba</i>	<i>officinalis</i>
5	<i>Buphtalmum</i>	<i>salicifolium</i>	27	<i>Sporobolus</i>	<i>heterolepis</i>
6	<i>Euphorbia</i>	<i>seguieriana</i>	28	<i>Centaurea</i>	<i>montana</i>
7	<i>Ajuga</i>	<i>reptans</i>	29	<i>Potentilla</i>	<i>neumanniana</i>
8	<i>Carex</i>	<i>flacca</i>	30	<i>Glechoma</i>	<i>hederacea</i>
9	<i>Trollius</i>	<i>europaeus</i>	31	<i>Hemerocallis</i>	<i>lilioasphodelus</i>
10	<i>Bergenia</i>	<i>cordifolia</i>	32	<i>Achillea</i>	<i>millefolium</i>
11	<i>Euphorbia</i>	<i>palustre</i>	33	<i>Phuopsis</i>	<i>stylosa</i>
12	<i>Helictotrichon</i>	<i>sempervirens</i>	34	<i>Carex</i>	<i>grayi</i>
13	<i>Geranium</i>	<i>x-pratense</i>	35	<i>Achnatherum</i>	<i>calamagrostis</i>
14	<i>Melica</i>	<i>ciliata</i>	36	<i>Carex</i>	<i>montana</i>
15	<i>Carex</i>	<i>comans</i>	37	<i>Carex</i>	<i>buchananii</i>
16	<i>Oenothera</i>	<i>missouriensis</i>	38	<i>Pennisetum</i>	<i>alopecuroides</i>
17	<i>Liatris</i>	<i>spicata</i>	39	<i>Knautia</i>	<i>macedonica</i>
18	<i>Brunnera</i>	<i>macrophylla</i>	40	<i>Iris</i>	<i>sibirica</i>
19	<i>Helianthemum</i>	<i>x-hybridum</i>	41	<i>Inula</i>	<i>ensifolia</i>
20	<i>Alchemilla</i>	<i>epipsila</i>	42	<i>Polemonium</i>	<i>caeruleum</i>
21	<i>Cardamine</i>	<i>pratensis</i>	43	<i>Campanula</i>	<i>glomerata</i>
22	<i>Mentha</i>	<i>pulegium</i>			

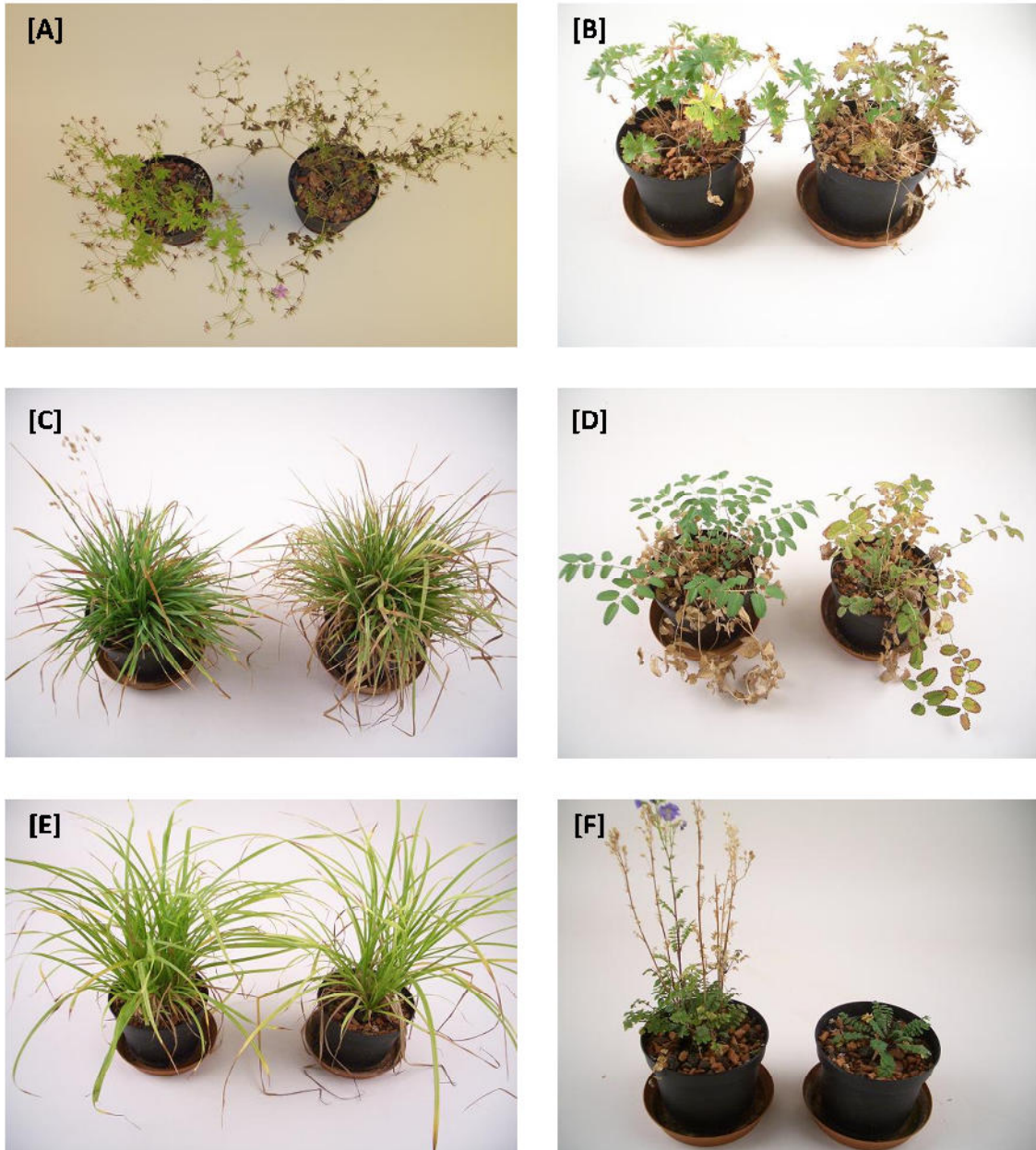
\* grau hinterlegt = auch in Tageslichtkammer getestet

Da die Ermittlung der Verdunstungsraten ein wesentlicher Zweck des Versuchs war, wurden zwölf Wochen nach Versuchsbeginn über die Hälfte der mit Leitungswasser gegossenen Pflanzen (23 von den insgesamt 43 Pflanzenarten, s. Tab. 3.1) für 22 Tage extremen Temperaturbedingungen (Tag/Nacht-Soll-Temperaturen von 30/20 °C) in einer Tageslichtkammer ausgesetzt. Bei der vierfach wiederholten Untersuchung erfolgte außerdem eine Variation des Bewässerungsmodus. Zum einen wurde täglich, zum anderen ca. wöchentlich (Trockenstress) mit Freisinger Leitungswasser auf das Sollgewicht aufgeossen. Als Kontrolle dienten vier Töpfe ohne Bepflanzung, um die Evaporation, d.h. die Verdunstung über die Substratoberfläche, getrennt von der Transpiration der Pflanze zu erfassen.

## 3.2 Versuchsergebnisse

### 3.2.1 Schadsymptome an den Pflanzen

Bereits zwei Monate nach Versuchsbeginn kam es in den Grauwasservarianten an *Geranium palustre* zu ersten Verbräunungen (Abb. 3.1).



**Abb. 3.1:** Pflanzen zwei [A] bzw. vier [B-F] Monate nach Versuchsbeginn, jeweils links LW und rechts GW; [A]: *Geranium palustre*, [B]: *Geranium x pratense*, [C]: *Briza media*, [D]: *Sanguisorba officinalis*, [E]: *Carex grayi*, [F]: *Polemonium caeruleum*

Wiederum zwei Monate später (Mitte Oktober) traten an folgenden weiteren Pflanzenarten leichte Symptome auf: *Geranium x pratense* (Verbräunungen), *Briza media*, *Sanguisorba officinalis* und *Carex grayi* (helleres Grün) sowie *Polemonium caeruleum* (weniger Frischmasse). Im Frühjahr 2013 trieben jedoch alle erwähnten Pflanzenarten wieder grün aus und blieben es auch bis zum Ende des Versuchs.



Am Versuchsende waren bei neun (GW) bzw. sieben (GW + AU) der 43 Pflanzenarten mehrheitlich deutliche Schadsymptome (Chlorosen bzw. Verbräunungen) oder sogar Ausfälle zu verzeichnen. Damit reagierten die in Tab. 3.2 aufgelisteten Arten negativ auf den Einsatz von Grauwasser. Allein *Veronica gentianoides* zeigte in allen Varianten, auch in der mit LW, deutliche Schadsymptome, die wohl dem hohen pH-Wert im Substrat geschuldet waren (s. Abschnitt 3.2.2).

Leichtere Chlorosen und Verbräunungen an mindestens 50 % der Pflanzen von *Buphthalmum salicifolium*, *Carex flacca*, *Hemerocallis lilioasphodelus* und *Iris sibirica*, die ebenfalls bei allen Gießwasservarianten auftraten, sind vermutlich auch auf die hohen pH-Werte im Substrat zurückzuführen.

**Tab. 3.2: Pflanzenarten mit deutlichen Schadsymptomen und Ausfällen zu Versuchsende (KW 18/13)**

<b>Gießwasser</b>	<b>Pflanzenarten, bei denen mind. 50 % aller Pflanzen deutliche Symptome aufwiesen</b>	<b>Pflanzenarten, bei denen mind. 50 % aller Pflanzen ausgefallen sind</b>
Grauwasser	<i>Veronica gentianoides</i> , <i>Liatris spicata</i> , <i>Phuopsis stylosa</i> , <i>Helianthemum x hybridum</i>	<i>Helianthemum x hybridum</i> , <i>Alchemilla epipsila</i> , <i>Cardamine pratensis</i> , <i>Mentha pulegium</i> , <i>Potentilla neumanniana</i>
Grauw. + Ausw.	<i>Veronica gentianoides</i> , <i>Trollius europaeus</i> , <i>Brunnera macrophylla</i>	<i>Helianthemum x hybridum</i> , <i>Alchemilla epipsila</i> , <i>Cardamine pratensis</i> , <i>Mentha pulegium</i>
Leitungswasser	<i>Veronica gentianoides</i>	0

### 3.2.2 Substratanalysen und Auswaschung

Der pH-Wert war im Ausgangssubstrat mit 9,8 sehr hoch (s. Tab. 7.5, Anhang). Wie sich bei den beiden weiteren Substratanalysen nach 17 Wochen und am Versuchsende nach 48 Wochen herausstellte (Tab. 3.3 und Tab. 3.4), fiel er während des Versuchs zwar etwas ab, blieb mit 7,8 bis 8,8 zum Versuchsende aber durchgängig hoch. Außerdem war bis zum Versuchsende im Substrat eine erhebliche Salzanreicherung zu verzeichnen. Da der Salzgehalt auch in der LW-Variante anstieg, dürfte die Zunahme zum Teil auf die hohe Härte des Freisinger Leitungswassers zurückzuführen sein.

Die N- und P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalte lagen in allen Varianten bis zum Versuchsende auf niedrigem Niveau. K<sub>2</sub>O war in deutlich höheren Mengen enthalten, wurde in der Variante GW+AU aber auch in gewissen Mengen ausgewaschen (Tab. 3.3). Vor allem der Na-Eintrag mit dem Grauwasser schlug sich deutlich in den Substratanalysen nieder. Die Gehalte lagen schon bei der ersten Analyse, besonders aber am Versuchsende in den GW-Varianten mindestens dreimal so hoch wie in den LW-Varianten (Tab. 3.4).

**Tab. 3.3: Substratanalysen<sup>1)</sup> in KW 42/12 nach den beiden Auswaschungen in KW 31 und 39/12**

Parameter	GW			GW + AU			LW		
	MW*	MIN*	MAX*	MW	MIN	MAX	MW	MIN	MAX
pH-Wert [CaCl <sub>2</sub> ]	<b>8,4</b>	8,1	8,5	<b>8,3</b>	8,2	8,6	<b>8,2</b>	8,0	8,6
Salz (g/l) [H <sub>2</sub> O]	<b>1,5</b>	0,8	2,4	<b>1,4</b>	0,9	2,0	<b>1,3</b>	0,9	1,8
NH <sub>4</sub> -N (mg/l) [CAT]	<b>4,1</b>	3,0	7,0	<b>2,7</b>	1,0	5,0	<b>3,3</b>	0,0	5,0
NO <sub>3</sub> -N (mg/l) [CAT]	<b>0,6</b>	0,0	24	<b>0,6</b>	0,0	8,0	<b>0,7</b>	0,0	12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/l) [CAT]	<b>4,0</b>	1,0	8,0	<b>11</b>	0,0	42	<b>15</b>	6,0	25
K <sub>2</sub> O (mg/l) [CAT]	<b>128</b>	55	231	<b>56</b>	6,0	136	<b>100</b>	52	156
Na (mg/l) [H <sub>2</sub> O]	<b>235</b>	111	438	<b>212</b>	108	391	<b>66</b>	40	92
Na (mg/l) [CAT]	<b>258</b>	156	417	<b>189</b>	89	334	<b>78</b>	48	130
Al (mg/l) [H <sub>2</sub> O]	<b>4,8</b>	2,7	8,6	<b>4,7</b>	2,3	8,1	<b>4,8</b>	2,4	8,5
Al (mg/l) [CAT]	<b>35</b>	20	66	<b>67</b>	50	96	<b>50</b>	31	71

<sup>1)</sup> vom ungebrochenen Material

\*MW = Mittel-, MIN = Minimal- und MAX = Maximalwerte der 43 Proben (Pflanzenarten)

**Tab. 3.4: Substratanalysen<sup>1)</sup> am Versuchsende (KW 22/13)**

Parameter	GW			GW + AU			LW		
	MW*	MIN*	MAX*	MW	MIN	MAX	MW	MIN	MAX
pH-Wert [CaCl <sub>2</sub> ]	<b>8,3</b>	7,8	8,8	<b>8,4</b>	8,2	8,7	<b>8,1</b>	7,8	8,3
Salz (g/l) [H <sub>2</sub> O]	<b>2,7</b>	2,0	3,8	<b>2,7</b>	2,0	3,6	<b>2,0</b>	0,9	2,5
NH <sub>4</sub> -N (mg/l) [CAT]	<b>0,4</b>	0,0	3,0	<b>1,4</b>	0,0	4,0	<b>1,9</b>	0,0	4,0
NO <sub>3</sub> -N (mg/l) [CAT]	<b>9,6</b>	0,0	63,0	<b>15,0</b>	3,0	71	<b>14,6</b>	0,0	49,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/l) [CAT]	<b>7,5</b>	5,0	12,0	<b>7,6</b>	4,0	12,0	<b>7,2</b>	2,0	15,0
K <sub>2</sub> O (mg/l) [CAT]	<b>241</b>	117	377	<b>228</b>	117	376	<b>187</b>	88	288
Na (mg/l) [H <sub>2</sub> O]	<b>731</b>	534	1053	<b>631</b>	450	839	<b>173</b>	98	246
Al (mg/l) [H <sub>2</sub> O]	<b>7,9</b>	5,0	10,0	<b>7,5</b>	4,0	11,0	<b>5,8</b>	3,0	10,0

<sup>1)</sup> vom gebrochenen Material

\* MW = Mittel-, MIN = Minimal- und MAX = Maximalwerte der 43 Proben (Pflanzenarten)

Auch in den Varianten mit Auswaschung waren noch beachtliche Na-Mengen enthalten. Ein Grund für die vergleichsweise geringe Auswaschung liegt darin, dass Na im Substrat, vermutlich v.a. im enthaltenen Ziegelbruch, eingelagert wird. Wie Tab. 3.5 zu entnehmen ist, lagen die Gehalte bei Analyse des gebrochenen Substrats - hierbei wird auch das Na im Innern der Substratbestandteile erfasst - mindestens zwei- bis dreimal so hoch wie die Gehalte bei Analyse des ungebrochenen Substrats.

**Tab. 3.5: Na-Gehalte im gebrochenen und im ungebrochenen Substrat am Versuchsende**

	gebrochen			ungebrochen		
	MW*	MIN*	MAX*	MW	MIN	MAX
Na (H <sub>2</sub> O)	<b>734</b>	534	1053	<b>327</b>	109	503
Na (CAT)	<b>1202</b>	879	1658	<b>388</b>	182	596

\* MW = Mittel-, MIN = Minimal- und MAX = Maximalwerte der 43 Proben

Die geringe Na-Auswaschung wird durch die Analyse der aufgefangenen Dränwässer (Tab. 3.6 und Tab. 3.7) bestätigt. Bei der ersten Auswaschung wurden von den 192 mg Na, die mit dem Grauwasser im Mittel bis dahin pro Liter Substrat eingetragen wurden, lediglich 14 mg ausgewaschen. Auch beim zweiten Auswaschungstermin war der Na-Austrag nicht wesentlich

höher (Tab. 3.7). Dabei ist jedoch zu bedenken, dass die Höhe der Na-Auswaschung sicherlich von der Zusammensetzung des Substrats abhängig ist.

Auch von den sonstigen mit dem Grauwasser bis zum ersten Termin eingebrachten Inhaltsstoffen wurden mit Ausnahme von Kalium nur maximal 10 % ausgewaschen, d.h. die Auswaschung fast aller Stoffe war nur gering (Tab. 3.6). Längerfristig ist ein höherer Prozentsatz allerdings nicht auszuschließen.

Bei der zweiten Auswaschung lagen die ausgetragenen Mengen absolut gesehen deutlich höher als beim ersten Termin. Bedenkt man jedoch, dass die mit dem Grauwasser eingetragene Stoffmenge bis zum zweiten Auswaschungstermin stark angestiegen ist, kann die zweite Auswaschung bei den meisten Inhaltsstoffen ebenfalls vernachlässigt werden. Dies gilt auch für anionische und nichtionische Tenside, deren Gehalte im Dränwasser der zweiten Auswaschung zusätzlich analysiert wurden (Tab. 3.7).

**Tab. 3.6: Erste Auswaschung in der Grauwasser-Variante GW+AU: pH-Wert und Leitfähigkeit des Dränwassers und damit ausgetragene im Vergleich zu den bis dahin eingetragenen Stoffmengen (in KW 31/12, sechs Wochen nach Versuchsbeginn)**

Parameter	ausgewaschen			mit Grauwasser eingetragene		
	MW*	MIN*	MAX*	MW	MIN	MAX
pH-Wert	7,4	7,1	7,8	-	-	-
LF (25 °C, µS/cm)	414	193	650	-	-	-
Salz (g/l Substrat)	0,1	0,0	0,1	0,7	0,4	1,0
Ca (mg/l Substrat)	7,1	2,5	14,5	110	57	164
Mg (mg/l Substrat)	1,6	0,6	2,9	34	17,6	51
K (mg/l Substrat)	4,9	1,9	10,5	5,2	2,7	7,8
Na (mg/l Substrat)	14,3	7,0	24	192	99	287
Al (µg/l Substrat)	28	15	61	-	-	-

\* MW = Mittel-, MIN = Minimal- und MAX = Maximalwerte der 43 Proben (Pflanzenarten)

**Tab. 3.7: Zweite Auswaschung in der Grauwasser-Variante GW+AU: pH-Wert und Leitfähigkeit des Dränwassers und damit ausgetragene Stoffmengen (in KW 37/12, zwölf Wochen nach Versuchsbeginn)**

Parameter	MW*	MIN*	MAX*
pH-Wert	7,5	7,1	7,8
LF (25°C) µS/cm	538	271	1173
Salz (g/l Substrat]	0,1	0,1	0,2
Na (mg/l Substrat]	25,6	13,0	58,2
Al (µg/l Substrat]	41,7	21,9	87,3
anionische Tenside (mg MBAS/l)	0,2	0,1	0,4
nichtionische Tens. (mg TritonX/l)	-	-	≤ 0,1 <sup>1)</sup>

\* MW = Mittel-, MIN = Minimal- und MAX = Maximalwerte der 43 Proben (Pflanzenarten) <sup>1)</sup> Nachweisgrenze

### 3.2.3 Frischmasse der Pflanzen

Am Ende des Versuchs wurde das Frischgewicht der Pflanzen als wichtiges Kriterium für die Verträglichkeit der Grauwassergaben ermittelt. Nur selten ergaben sich zwischen den Gießwasservarianten absicherbare Unterschiede. Mit einem Totalausfall reagierte ausschließlich *Alchemilla epipsila* besonders heftig auf die Grauwassergaben. Folgende sieben der geprüften 43 Arten wuchsen in wenigstens einer der beiden Grauwasser-Varianten signifikant schlechter als beim Gießen mit Leitungswasser (Abb. 3.2): *Helianthemum x hybridum*, *Cardamine pratensis*, *Mentha pulegium*, *Briza media*, *Potentilla neumanniana*, *Phuopsis stylosa* und *Inula ensifolia*.

Die Auswaschung hatte, wenn überhaupt, meist nur minimale positive Auswirkungen auf das Wachstum.

Drei Pflanzenarten, nämlich *Hemerocallis lilioasphodelus*, *Brunnera macrophylla* und *Knautia macedonica*, entwickelten sich in den Grauwasser-Varianten sogar signifikant besser als in der Kontrolle mit LW. In diesen Fällen wirkte sich die Auswaschung zumindest in der Tendenz negativ aus.

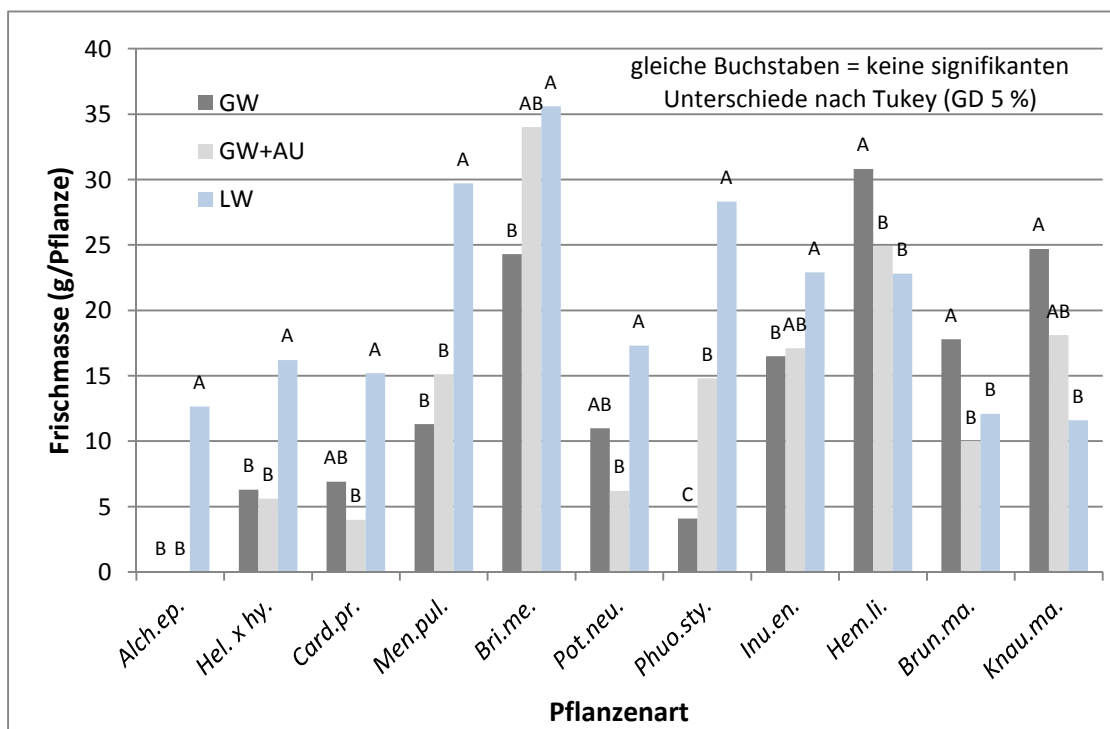


Abb. 3.2: Frischmasse der Pflanzenarten am Versuchsende (KW 26/13), bei denen sich signifikante Unterschiede zwischen den Bewässerungsarten ergaben

Erwartungsgemäß ergaben sich zwischen den Pflanzenarten zum Teil große Wachstumsunterschiede. Die mit Abstand höchste Frischmasse (gemittelt über alle Bewässerungsvarianten) bildete *Bergenia cordifolia* (112,8 g/Pflanze), gefolgt von *Liatris spicata* (36,6 g/Pfl.), *Oenothera missouriensis* (34,9 g/Pfl.), *Euphorbia seguieriana* (33,5 g/Pfl.) und *Carex grayi* (31,4 g/Pfl.). Am unteren Ende der Skala rangierten *Melica ciliata* (5 g/Pfl.), *Achnatherum calamagrostis* (7,3 g/Pfl.), *Trollius europaeus* (8,4 g/Pfl.), *Carex comans* (9,5 g/Pfl.) und *Iris sibirica* (10,2 g/Pfl.).

### 3.2.4 Evapotranspiration bei Bepflanzung mit unterschiedlichen Pflanzenarten

#### 3.2.4.1 Messungen im Gewächshaus

Die Ermittlung der Transpiration der Pflanzen (inklusive Evaporation über das Substrat) war ein wesentlicher Zweck dieses Pflanzenversuchs. Dazu wurde der Wasserverbrauch ermittelt, aus dem sich auf die Evapotranspiration schließen lässt.

Insgesamt lag der Wasserverbrauch/Topf im Mittel der drei Gießvarianten bei den Gräsern zwischen 12,0 (*Achnatherum*) und 22,5 (*Briza*) Liter (Tab. 3.8) und bei den Kräutern in vergleichbarer Größenordnung zwischen 12,1 (*Cardamine*) und 22,8 (*Bergenia*) Liter (Tab. 3.9).

Gemittelt über alle Pflanzenarten waren die Unterschiede im Wasserverbrauch zwischen den Bewässerungsarten nicht sehr groß (Tab. 3.10). Tendenziell lag er in den Varianten mit Leitungswasser am höchsten (16,9 l/Topf) und in denjenigen mit Grauwasser am niedrigsten (15,7 l/Topf). Die Auswaschung hatte eine leichte Erhöhung des Wasserverbrauchs zur Folge (16,1 l/Topf). Diese Reihung wurde bei den meisten Pflanzenarten eingehalten. Es ergab sich aber durchaus vereinzelt die gegenteilige Rangfolge bzw. es waren keine Unterschiede feststellbar.

**Tab. 3.8: Wasserverbrauch der getesteten Gräserarten, gemittelt über die drei Bewässerungsarten**

Pflanzenart	Wasserverbrauch (l/Topf)
<b><i>Briza media</i>*</b>	<b>22,5</b>
<b><i>Carex buchananii</i></b>	<b>22,1</b>
<b><i>Carex flacca</i></b>	<b>18,5</b>
<i>Carex grayi</i>	18,1
<i>Carex comans</i>	17,1
<i>Carex montana</i>	14,4
<i>Pennisetum alopecuroides</i>	13,9
<i>Sporobolus heterolepis</i>	13,5
<i>Helictotrichon sempervirens</i>	12,8
<i>Melica ciliata</i>	12,1
<i>Achnatherum calamagrostis</i>	12,0

\* Fettdruck: Pflanzenarten, die im nachfolgenden zweiten Pflanzenversuch eingesetzt wurden

**Tab. 3.9: Wasserverbrauch (WV) der getesteten Kräuterarten (l/Topf), gemittelt über die drei Bewässerungsarten**

Pflanzenart	WV	Pflanzenart	WV	Pflanzenart	WV
<b><i>Bergenia cordifolia</i>*</b>	<b>22,8</b>	<i>Geranium palustre</i>	16,3	<i>Buphtalmum salicifolium</i>	14,8
<b><i>Euphorbia palustre</i></b>	<b>20,7</b>	<i>Oenothera missouriensis</i>	16,3	<i>Campanula glomerata</i>	14,6
<b><i>Euphorbia seguieriana</i></b>	<b>20,5</b>	<i>Hemerocallis lilioasphod.</i>	16,2	<i>Geum rivale</i>	14,5
<b><i>Sanguisorba officinalis</i></b>	<b>19,6</b>	<i>Glechoma hederacea</i>	16,1	<i>Trollius europaeus</i>	14,4
<b><i>Hemerocallis minor</i></b>	<b>18,4</b>	<b><i>Inula ensifolia</i></b>	<b>16,1</b>	<i>Polemonium caeruleum</i>	14,1
<b><i>Achillea millefolium</i></b>	<b>18,3</b>	<i>Leucanthemum vulgare</i>	16,0	<i>Potentilla neumanniana</i>	14,1
<i>Veronica gentianoides</i>	18,0	<i>Centaurea montana</i>	15,9	<i>Ajuga reptans</i>	14,0
<i>Phuopsis stylosa</i>	17,4	<b><i>Geranium x-pratense</i></b>	<b>15,8</b>	<i>Knautia macedonica</i>	13,9
<i>Crambe cordifolia</i>	16,9	<i>Mentha pulegium</i>	15,6	<i>Iris sibirica</i>	13,3
<i>Helianthemum x-hybr.</i>	16,9	<i>Brunnera macrophylla</i>	15,5	<i>Cardamine pratensis</i>	12,1
<i>Alchemilla epipsila</i>	16,7	<i>Liatris spicata</i>	15,4		

\* Fettdruck: Pflanzenarten, die im zweiten Pflanzenversuch eingesetzt wurden

**Tab. 3.10: Wasserverbrauch der Pflanzenarten bei unterschiedlicher Bewässerung, gemittelt über die Pflanzenarten**

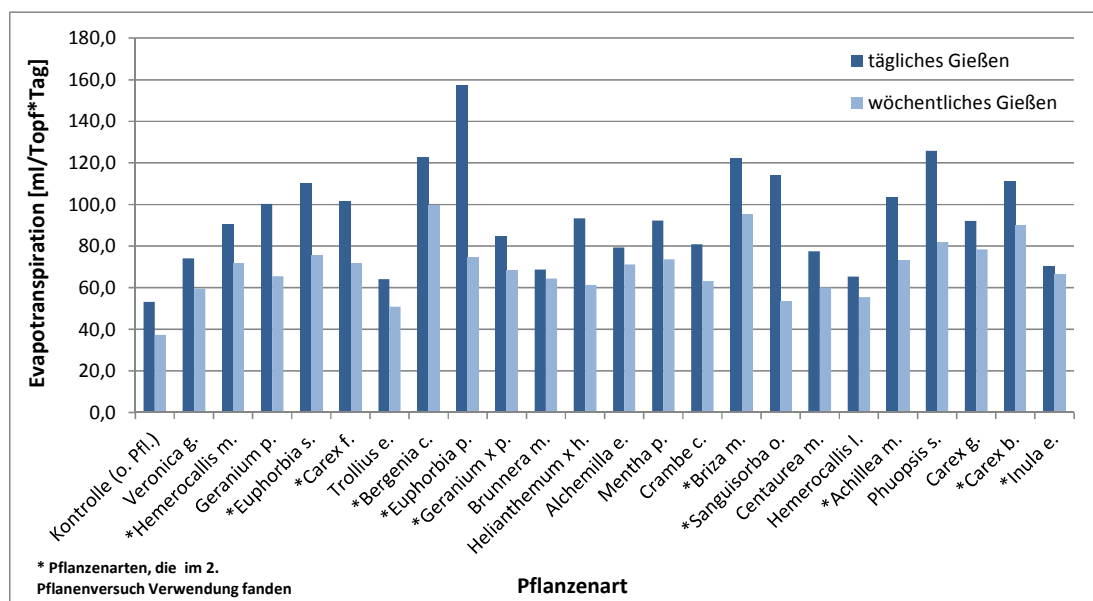
Bewässerung	MW* (l/Topf)	MIN* (l/Topf)	MAX* (l/Topf)
GW	15,7	11,2	22,1
GW + AU	16,1	11,9	21,6
LW	16,9	11,7	24,8

\* MW = Mittel-, MIN = Minimal- und MAX = Maximalwerte

### 3.2.4.2 Messungen in der Tageslichtkammer

Zur Ermittlung der Evapotranspiration unter extremen Temperaturbedingungen wurden zwölf Wochen nach Versuchsbeginn 23 Pflanzenarten für 22 Tage in einer Tageslichtkammer kultiviert. Dabei wurde der Wasserverbrauch durch Wiegen ermittelt und durch Gießen auf das Sollgewicht wieder ausgeglichen.

Bei wöchentlichem Gießen lag die Evaporation in der Kontroll-Variante ohne Pflanzen bei 37 g/Topf und Tag (Abb. 3.3). Durch die Kräuter-Bepflanzung stieg die Verdunstung bei gleichem Gießmodus um 36 (*Trollius europaeus*) bis 176 % (*Bergenia cordifolia*) an. Bei den Gräsern gehörten *Briza media* mit einer Steigerung um 156 % und *Carex buchananii* mit einer um 142 % zu den transpirationsstärksten Pflanzen. Im Vergleich zum wöchentlichen Gießen erhöhte sich die Evaporation durch tägliches Aufgießen in der Kontrolle um 43 %. Bei Bepflanzung war die größte Steigerung durch das tägliche Gießen und damit ohne Trockenheitsstress bei *Sanguisorba officinalis* (113 %) bzw. bei *Euphorbia palustre* (111 %) zu verzeichnen.



**Abb. 3.3: Evapotranspiration ausgewählter Pflanzenarten während 22-tägiger Kultur in einer Tageslichtkammer unter extremen Temperaturbedingungen**

## 3.3 Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass nur rund ein Fünftel der geprüften 43 Pflanzenarten eindeutig negativ auf das Gießen mit Grauwasser reagierte und die beiden Auswaschungen keinen wesentlichen Einfluss auf das Pflanzenwachstum hatten. Beim Wasserverbrauch der verschiedenen Gräser- und Kräuterarten ergaben sich z.T. große Unterschiede.

## 4 Vegetationsversuche mit Kräuter/Gräser-Mischungen im Vergleich zu herkömmlichen *Sedum*-Bepflanzungen unter Verwendung von Grauwasser

Im zweiten Pflanzenversuch fanden diejenigen Pflanzenarten Verwendung, die sich im ersten als relativ gut grauwasserverträglich und transpirationsstark herausgestellt hatten. Es waren drei Gräserarten (*Briza media*, *Carex buchananii* und *Carex flacca*) und acht Kräuterarten: *Achillea millefolium*, *Bergenia cordifolia*, *Euphorbia seguieriana*, *Euphorbia palustre*, *Geranium x pratense*, *Hemerocallis minor*, *Inula ensifolia* und *Sanguisorba officinalis*. Sie wurden unterschiedlich kombiniert im Vergleich zu *Sedum*, der bisherigen Standardbepflanzung in der extensiven Dachbegrünung, an verschiedenen Standorten (Gewächshaus, Tageslichtkammer und Freiland) jeweils mit Grauwasser im Vergleich zu Leitungswasser zur Bewässerung kultiviert. Als Substrat diente in allen Varianten, wie schon im ersten Pflanzenversuch, die Systemerde "Sedumteppich" (s. Tab. 7.8 und Abb. 7.2). Im Gewächshaus wurde der Einfluss der ausschließlichen Verwendung von Grauwasser auf das Pflanzenwachstum und die Evapotranspiration über einen langen Zeitraum erfasst (66 Wochen bzw. fast zwei Vegetationsperioden). In der Tageslichtkammer wurden die Pflanzen sechs Wochen lang extremen Klimabedingungen (hohe Temperatur, Luftfeuchte und Einstrahlung) ausgesetzt. Im Freiland ging es u.a. darum, den Pflegebedarf zu ermitteln sowie das mengenmäßige Aufkommen von Sickerwasser, dessen Inhaltsstoffe analysiert wurden. Zur Einstufung der Evapotranspiration wurde auf Basis der Daten des Agrarmeteorologischen Messnetzes Bayern die FAO-56 Referenzverdunstung errechnet, die die potentielle Evapotranspirationsleistung einer kurz geschnittenen Freilandgrasfläche bei optimaler Wasserversorgung des Bodens darstellt [AS98].

### 4.1 Gewächshaus und Tageslichtkammer

#### 4.1.1 Angaben zum Versuch

Als Versuchsgefäße dienten 0,43 m<sup>2</sup> große Schalen aus Kunststoff, die mit je 40 Liter Substrat in einschichtiger Bauweise (Substratschichthöhe 10 cm) befüllt waren (Abb. 4.1). Der Aufbau der fünf Pflanzmodule ist Abb. 4.2 sowie Tab. 4.1 und Tab. 7.6 zu entnehmen. Weitere Angaben zum Versuch sind in aufgelistet.



Abb. 4.1: Kunststoffschalen im Gewächshaus zu Versuchsbeginn (KW 27/13)



1



2



3



4



5



Abb. 4.2: Pflanzmodule 1-5 (siehe Tab. 4.1) kultiviert im Gewächshaus, links in KW 35/13 (acht Wochen nach Versuchsbeginn) und rechts am Versuchsende in KW 40/14

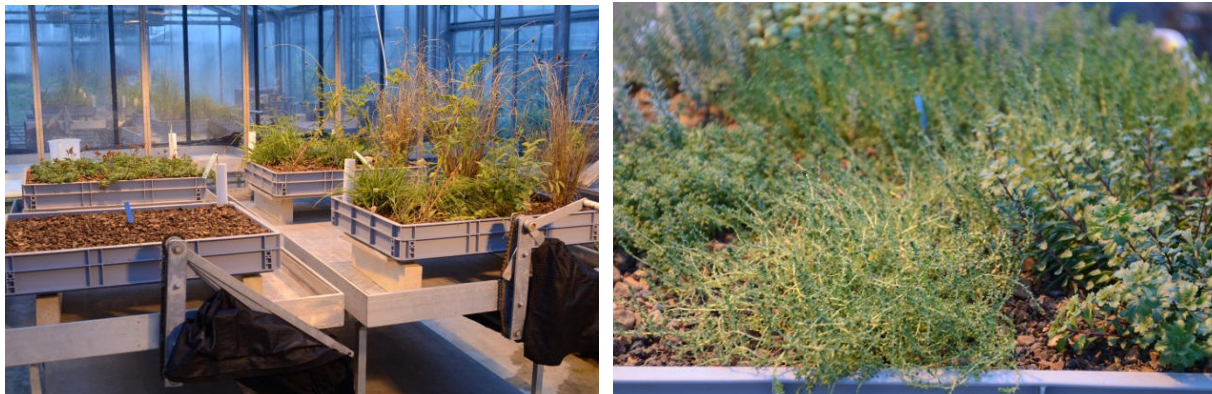


**Tab. 4.1: Versuchsplan "Vegetationsversuch mit Kräuter/Gräser-Mischungen im Vergleich zu herkömmlichen *Sedum*-Bepflanzungen unter Verwendung von Grauwasser - Gewächshaus"**

Variante	Pflanzmodul (jeweils 10 Pflanzen/Schale)	Gießwasser
1	80 % Kräuter + 20 % Gräser (80K/20G)	Grauwasser
2	50 % Kräuter + 50 % Gräser (50K/50G)	
3	20 % Kräuter + 80 % Gräser (20K/80G)	
4	100 % <i>Sedum</i> -Mix (S.-Mix)	
5	100 % <i>Sedum floriferum</i> 'Weihenstephaner Gold' (S.'WG')	
6	ohne Bepflanzung (nur Substrat) (OV)	
7	ohne Bepflanzung (nur Wasser) (GW)	
8-14	entsprechend 1-7	Leitungswasser

Die Verdunstungsraten wurden wieder indirekt ermittelt, indem die Schalen wöchentlich gewogen und die Differenz zum Sollgewicht berechnet wurde. Danach erfolgte das Aufgießen auf das Sollgewicht mit dem entsprechenden Gießwasser.

Ab KW 38/13 wurde die Evapotranspirationsleistung von zwei Wiederholungen (zwei Schalen/Variante) der mit Leitungswasser gegossenen Module außer der Wasser-Variante (Var. 8-13) für sechs Wochen in zwei Tageslichtkammern (Abb. 4.3) bei extremen Klimabedingungen (siehe Tab. 7.9) ermittelt. In der ersten Kammer wurden alle Module dreimal/Woche auf das Sollgewicht aufgegosen. In der zweiten erfolgte einmal wöchentlich eine Bewässerung bei den Kräuter/Gräser-Modulen. Die *Sedum*-Varianten wurden nur einmalig zu Beginn auf maximale Wasserspeicherung gegossen. Danach unterblieb dies, um sie wie derzeit in Trockenzeiten üblich ohne Zusatzbewässerung zu testen. Zudem waren in allen Pflanzschalen in einer Tiefe von etwa 3 cm Telids (Temperatur-Datalogger) vergraben, die stündlich die Substrattemperatur aufzeichneten.



**Abb. 4.3: Links: Pflanzmodule in der Tageslichtkammer in KW 38/13; rechts: Trockenstresssymptome an *Sedum acre* nach vier Wochen Trockenheit**

## 4.1.2 Ergebnisse

### 4.1.2.1 Evapotranspiration - Messung im Gewächshaus

In den Abb. 4.4 und Abb. 4.5 sind die mittleren täglichen Verdunstungsraten der verschiedenen Versuchsmodule von August 2013 (ungefähr drei Wochen nach Versuchsbeginn) bis zum Versuchsende (September 2014) dargestellt. Nach nennenswerter Verdunstung von August bis Oktober 2013 kam es nach dem Einziehen der Pflanzen im November und der Winterpause erst wieder im Juli 2014, dem heißesten Monat des Jahres, zu hohen Werten. Hier wurden die

höchsten Verdunstungsraten während des gesamten Versuchs von 5,0 (LW) bzw. 4,7 (GW) l/m<sup>2</sup> und Tag jeweils in der Variante 80K/20G erreicht. In den Folgemonaten reduzierte sich die Verdunstung mit abnehmenden Temperaturen und Einstrahlungswerten wieder stetig.

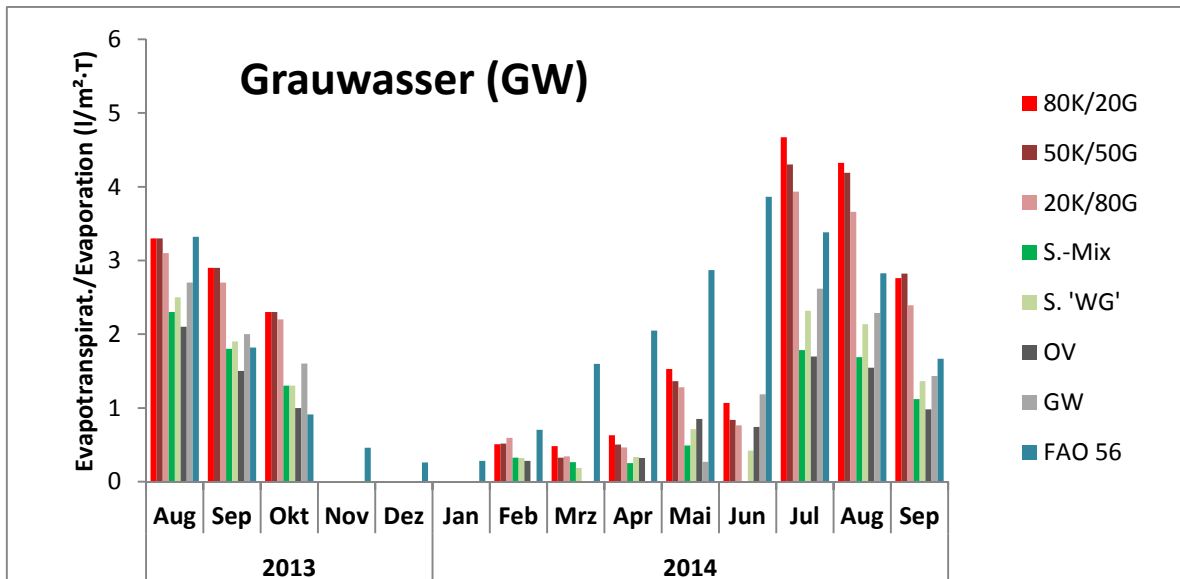


Abb. 4.4: Mittlere Verdunstungsraten der unterschiedlichen Pflanzmodule im Gewächshaus bei Verwendung von Grauwasser im Vergleich zur Standardverdunstung FAO 56 im Freiland (Standort Freising)

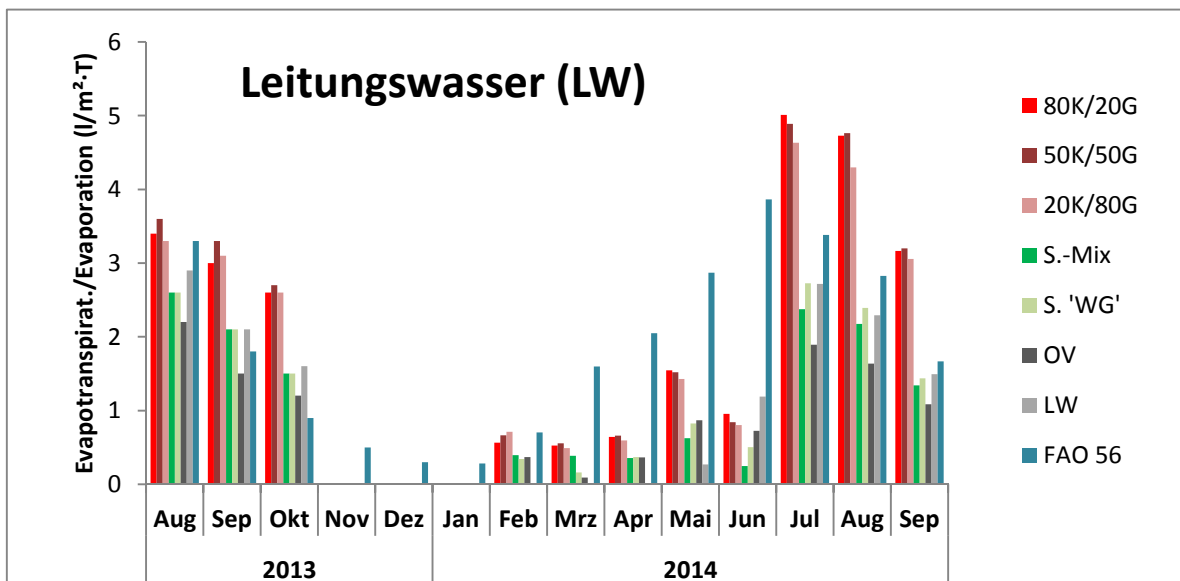


Abb. 4.5: Mittlere Verdunstungsraten der unterschiedlichen Pflanzmodule im Gewächshaus bei Verwendung von Leitungswasser im Vergleich zur Standardverdunstung FAO 56 im Freiland (Standort Freising)

In den Sommermonaten war die Verdunstung in den Schalen, die nur mit Substrat befüllt waren (OV), am geringsten. Die *Sedum*-Bepflanzung hatte im Vergleich dazu meist eine Steigerung um 20 bis 40 % zur Folge. In der Grauwasservariante mit dem *Sedum*-Mix war dieser Vorsprung im Sommer 2014 allerdings nur noch minimal. In der Regel wiesen die mit *Sedum* bepflanzten Schalen eine etwas niedrigere Verdunstung auf als diejenigen, die ausschließlich Wasser enthielten. Beim Vergleich der beiden *Sedum*-Varianten lag der *Sedum*-Mix meist etwas niedriger als die *Sedum* 'WG'-Variante.

Durch die Bepflanzung mit den Kräuter/Gräser-Mischungen erhöhte sich die Verdunstung im Vergleich zur Variante mit unbepflanztem Substrat 2013 um 60 bis 120 %. 2014 lag sie sogar um bis zu 196 % höher, vermutlich weil die Pflanzen besser eingewurzelt und entwickelt waren. Der Vorsprung zu den *Sedum*-Varianten betrug 25 bis 75 % in 2013 und 75 bis 150 % in 2014. Zwischen den drei Kräuter/Gräser-Mischungen ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede. Tendenziell erwiesen sich bei Verwendung von Grauwasser die Mischungen mit 50 und 80 % Kräutern als etwas verdunstungsstärker als diejenige mit 20 % Kräutern.

Zum Vergleich ist in den Abbildungen 4.4 und 4.5 jeweils die standardisierte Verdunstung einer Freilandrasenfläche unter den jeweiligen Freisinger Klimabedingungen (FAO 56) eingezeichnet. Diese wird in allen Sommermonaten, außer August 2013, von den Kräuter/Gräser-Mischungen weit übertroffen. Dies ist umso bemerkenswerter, da in Gewächshäusern die Einstrahlung niedriger und die Luftfeuchte höher ist als unter Freilandbedingungen, was ein geringeres Verdunstungsniveau nach sich zieht. Demzufolge ist der Vorsprung der Kräuter/Gräser-Mischungen gegenüber dem FAO 56-Wert eigentlich noch etwas größer als hier dargestellt.

Insgesamt war die Evapotranspiration in allen bepflanzten Schalen, die mit Leitungswasser gegossen wurden, im ersten Jahr um 5-10 % und im zweiten Jahr um 7-22 % höher als beim Einsatz von Grauwasser.

In fast allen Varianten ragte die Verdunstungsrate der Woche vom 16.-22.7.2014 besonders heraus, da ab dem 16.7. vier heiße Tage mit besonders hoher Einstrahlung folgten. Nur in den beiden *Sedum*-Modulen, die mit Grauwasser gegossen wurden, blieb dieser Peak aus (Tab. 4.2).

**Tab. 4.2: Relative Evapotranspiration/Evaporation in der Woche vom 16.-22.7.2014 mit hoher Einstrahlung\* gegenüber dem Mittel der drei Wochen vor- und nachher (in %)**

	80K/20G	50K/50G	20K/80G	S.-Mix	S.'WG'	OV	Wasser
Grauwasser	134,3	130,5	133,4	103,3	104,3	129,9	131,0
Leitungswasser	136,6	134,3	136,3	131,4	125,7	146,8	141,1

\* mittlere PAR (= photosynthetisch aktive Strahlung, Wetterdienst Weißenstephan) Woche 16.-22.7.: 712 J/cm<sup>2</sup> (16.-19.7.: 807 J/cm<sup>2</sup>), 3 Wochen vorher/nachher: 541/544 J/cm<sup>2</sup>; mittlere Temperatur Woche 16.-22.7.: 20,6 °C (16.-19.7.: 21,5°C), 3 Wochen vorher/nachher: 15,0 °C/19,5 °C

Dies ist vermutlich auf den Crassulaceen-Säurestoffwechsel, kurz CAM (= *crassulacean acid metabolism*) zurückzuführen, zu dem *Sedum* genauso wie viele andere Pflanzenarten, die in heißen Klimaten wachsen, fähig ist. Während die meisten Pflanzen CO<sub>2</sub> tagsüber sowohl aufnehmen als auch fixieren, sind diese Vorgänge bei Pflanzen mit CAM-Mechanismus zeitlich voneinander getrennt. Das für die Photosynthese benötigte CO<sub>2</sub> wird hier in der Nacht aufgenommen und chemisch in Form von Äpfelsäure in den Vakuolen der Zelle gespeichert. Am darauf folgenden Tag wird es aus der Äpfelsäure wieder freigesetzt und steht zum Aufbau von Kohlenhydraten zur Verfügung. Der Vorteil des Crassulaceen-Säurestoffwechsels ist, dass die Pflanzen während der heißen Tagesstunden ihre Spaltöffnungen geschlossen lassen und die Transpiration damit einstellen, ohne dass die Photosynthese zum Erliegen kommt.

Offensichtlich ist unter Salzstress bei hohen Einstrahlungswerten und/oder Temperaturen der Zeitpunkt des Schließens früher erreicht, was das Ausbleiben des Verdunstungspeaks nur in den mit Grauwasser gegossenen *Sedum*-Modulen erklären würde. Wie das Ergebnis der Substratanalyse am Versuchsende zeigt (Tab. 4.3), lagen die Salzgehalte der *Sedum*-Module bei

Bewässerung mit Grauwasser zwar nur geringfügig höher als bei Leitungswasser, aber in Kombination mit den deutlich erhöhten Na-Gehalten in den Grauwasser-Varianten könnte dies zum früheren Schließen der Stomata geführt haben.

**Tab. 4.3: Analyse des gebrochenen Substrates am Versuchsende**

Pflanz-modul	pH-Wert [CaCl <sub>2</sub> ]	Salz [H <sub>2</sub> O] g/l	N [CAT] mg/l	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [CAT] mg/l	K <sub>2</sub> O [CAT] mg/l	Na [CAT] mg/l	Na [H <sub>2</sub> O] mg/l
80K/20G	8,1*	4,60	8	19	253	1162	1224
50K/50G	8,2	4,24	9	13	234	1027	1019
20K/80G	8,1	4,02	17	16	251	942	933
S.-Mix	8,0	3,25	10	16	336	582	572
S.'WG'	8,1	3,33	6	18	293	674	660
OV	8,2	2,39	21	15	235	516	493
80K/20G	8,0	3,33	7	15	176	260	242
50K/50G	8,0	3,62	6	17	172	278	285
20K/80G	7,9	3,37	9	18	167	220	208
S.-Mix	7,9	2,82	5	17	172	182	156
S.'WG'	7,9	3,08	4	16	254	186	180
OV	8,1	3,02	38	11	206	162	150

\* Grau/nicht hinterlegt: Grau-/Leitungswasser

#### 4.1.2.2 Evapotranspiration - Messung in der Tageslichtkammer

In der Tageslichtkammer ergab sich hinsichtlich der Verdunstungsraten der unterschiedlichen Pflanzmodule nahezu das gleiche Bild wie im Gewächshaus. Bei dreimal wöchentlicher Bewässerung fand die weitaus meiste Verdunstung in den Kräuter/Gräser-Mischungen statt mit durchschnittlich 2,3 bis 2,5 l/m<sup>2</sup>·T (Abb. 4.6) im Vergleich zu 1,1 l/m<sup>2</sup>·T in den *Sedum*-Varianten. Damit lag die Verdunstung in der Tageslichtkammer auf gleichem Niveau wie im Oktober 2013 bei den mit Leitungswasser gegossenen Varianten im Gewächshaus (Abb. 4.5). In der Variante ohne Bepflanzung war die Evaporation durchschnittlich 20 % niedriger als bei *Sedum*-Bepflanzung.

In den *Sedum*-Varianten, die nur zu Beginn einmalig auf volle Wasserspeicherung gegossen wurden, sank die Evapotranspiration im weiteren Versuchsverlauf stark ab (Abb. 4.7, hier sind nur die relativen Werte dargestellt, da die Schalen in zwei Tageslichtkammern mit etwas unterschiedlichen Klimabedingungen standen). Ab der fünften Woche traten an *Sedum acre* (Teil des *Sedum*-Mix) sogar Trockenstress-Symptome auf (Abb. 4.3). Insgesamt verdunstete in den *Sedum*-Varianten die komplette Wassermenge, die im Substrat zu Versuchsbeginn enthalten war.

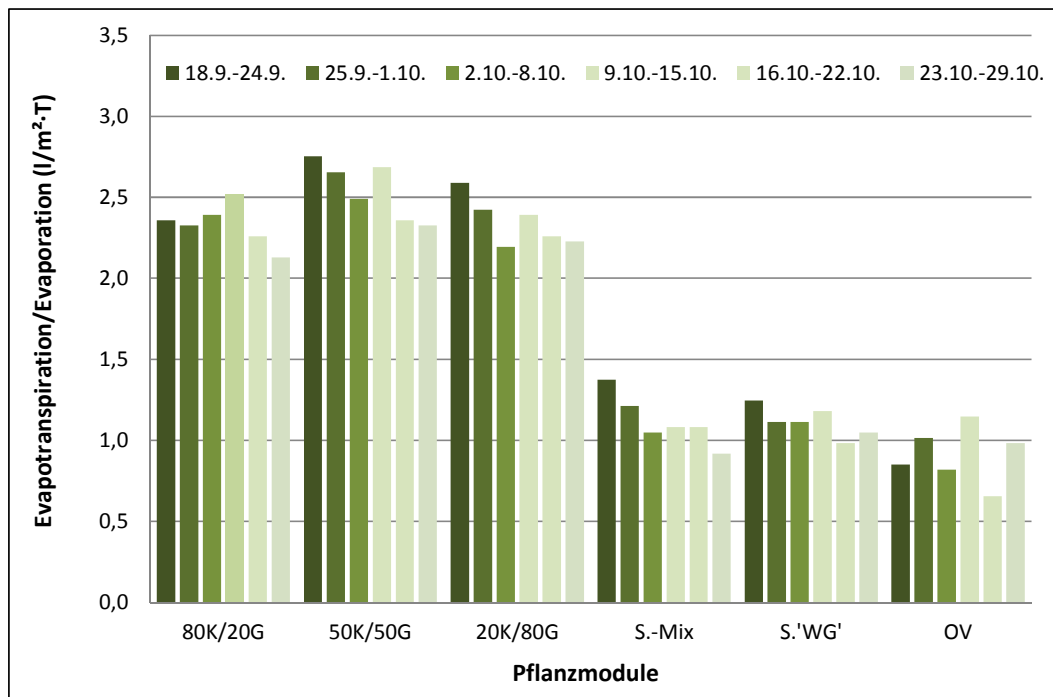


Abb. 4.6: Mittlere tägliche Verdunstungsraten der dreimal wöchentlich mit Leitungswasser gegossenen Pflanzmodule in der Tageslichtkammer

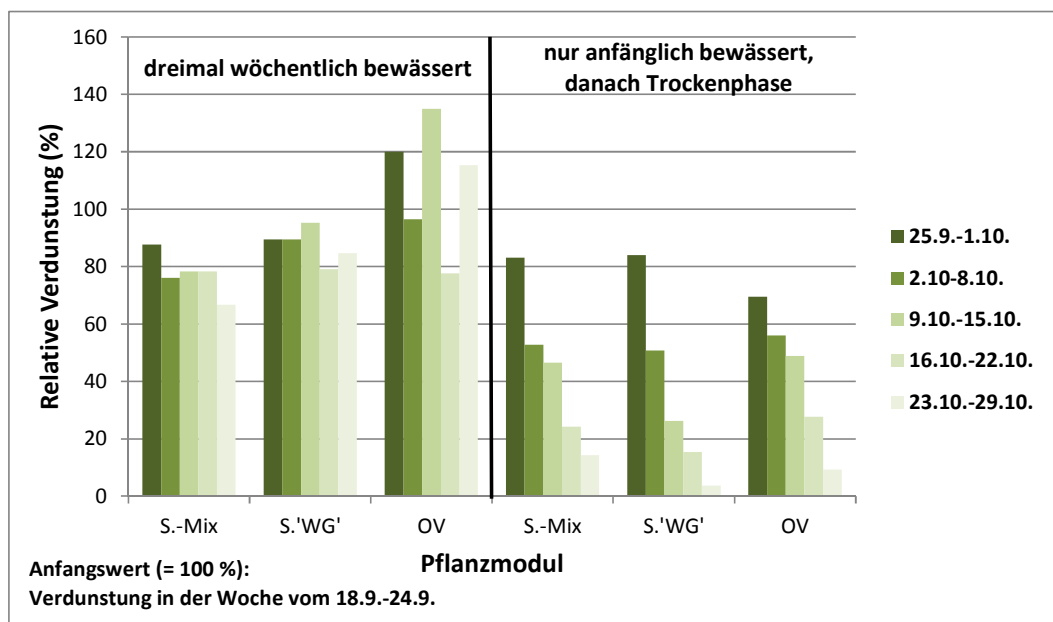


Abb. 4.7: Relative Verdunstung verschiedener *Sedum*-Begrünungen in Tageslichtkammern in Abhängigkeit von der Bewässerung

#### 4.1.2.3 Fazit der Evapotranspirationmessungen

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die drei Kräuter/Gräser-Mischungen sowohl im Gewächshaus, in dem sie über den langen Zeitraum von knapp 15 Monaten mit Grauwasser gegossen wurden als auch in der Tageslichtkammer mit extremen Klimabedingungen über sechs Wochen weitaus mehr Wasser verdunsteten als die *Sedum*-Bepflanzungen.

Auch wenn die Verdunstungsraten in den Leitungswasser-Varianten meist um rund 10 bis 20 % höher lagen als in den Grauwasser-Varianten, wurden in letzteren auch noch beachtliche Werte erzielt, so dass der Einsatz von Grauwasser zur Bewässerung extensiver Dachbegrünungen mit den geprüften Kräuter- und Gräserarten empfohlen werden kann.

#### 4.1.2.4 Temperaturen im Substrat - Messung in der Tageslichtkammer

Neben den positiven klimatischen Auswirkungen auf die Umgebungsluft durch Verdunstungskälte wird Dachbegrünungen auch eine Kühlung der Dachhaut nachgesagt. Dies bestätigten Messungen im Substrat 3 cm unter der Oberfläche, wobei sich in den unterschiedlichen Pflanzmodulen verschiedene Temperaturen ergaben (Abb. 4.8 bis Abb. 4.12). In den Kräuter/Gräser-Mischungen waren die Substrattemperaturen im gesamten Beobachtungszeitraum 2 bis 2,5 °C niedriger als die Raumtemperatur. Im Substrat der *Sedum*-Module hingegen, die nur anfänglich gegossen wurden, war es lediglich zu Versuchsbeginn noch 1 bis 2 °C kühler als in der Umgebungsluft. Im Laufe des Versuchs wurde diese Differenz immer kleiner und am Versuchsende hatten sich beide Temperaturen angeglichen. In der Variante ohne Bepflanzung bestand während des gesamten Versuchs nahezu kein Unterschied zwischen Substrat- und Raumtemperatur (Abb. 4.13).

In Tab. 4.4 sind die Mittel-, Maximal- und Minimalwerte der Substrattemperaturen zusammengestellt. In den regelmäßig bewässerten Kräuter/Gräser-Modulen lagen sie im Mittel um bis zu 2,2 °C niedriger als bei *Sedum*-Bepflanzung (ohne Bewässerung) und um bis zu 2,5 °C niedriger als in der Variante ohne Bepflanzung. Bei den Maximalwerten ergaben sich sogar Unterschiede von bis zu 5 bzw. 7 °C.

**Tab. 4.4: Im Substrat der unterschiedlichen Pflanzmodule aufgezeichnete Temperaturen (°C)**

Pflanzmodul	MW*	MIN*	MAX*	Pflanzmodul	MW	MIN	MAX
80K/20G	21,1	16,5	26,5	S.-Mix	23,2	17,5	31,5
50K/50G	21,5	16,5	28,0	S.'WG'	22,8	17,0	31,0
20K/80G	21,0	15,5	28,0	OV	23,5	16,0	33,5

\* MW = Mittel-, MIN bzw. MAX = Minimal- bzw. Maximalwerte (KW 38/13 - 44/13)

Die Temperaturabsenkungen in den mit Kräutern und Gräsern bepflanzten Schalen sind vor allem auf den Beschattungseffekt der Pflanzen zurückzuführen, der die Aufheizung des Substrats stark vermindert. Vermutlich spielt darüber hinaus das Kleinklima innerhalb des Pflanzenbewuchses eine gewisse Rolle. Durch die dauerhaft hohe Verdunstung der bewässerten Kräuter/Gräser-Mischungen war die Temperatur in den Pflanzenbeständen sicherlich um einiges niedriger als bei den langsam austrocknenden *Sedum*-Bepflanzungen.

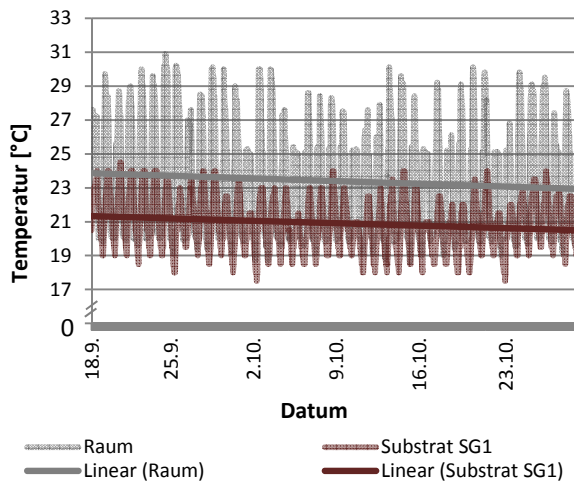


Abb. 4.8: Temperaturverlauf in der Raumluft und im Substrat des Pflanzmoduls 80K/20G (= SG1, 18.9.-29.10.2013)

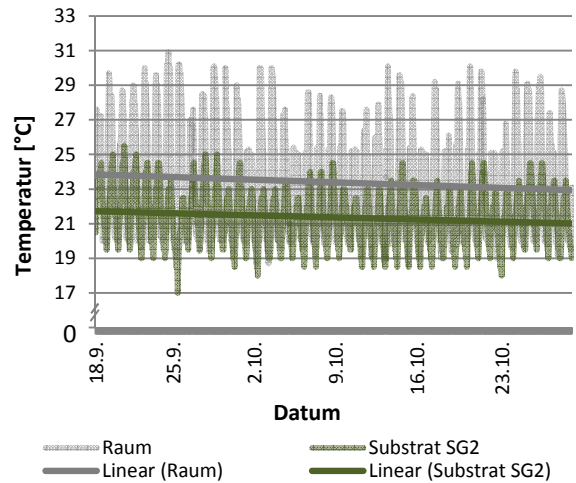


Abb. 4.9: Temperaturverlauf in der Raumluft und im Substrat des Pflanzmoduls 50K/50G (= SG2, 18.9.-29.10.2013)

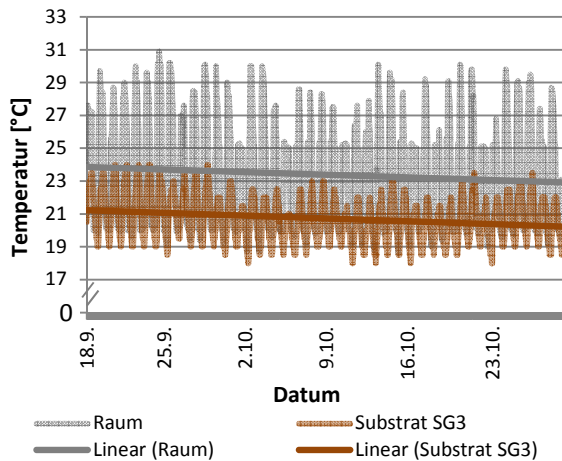


Abb. 4.10: Temperaturverlauf in der Raumluft und im Substrat des Pflanzmoduls 20K/80G (= SG3, 18.9.-29.10.2013)

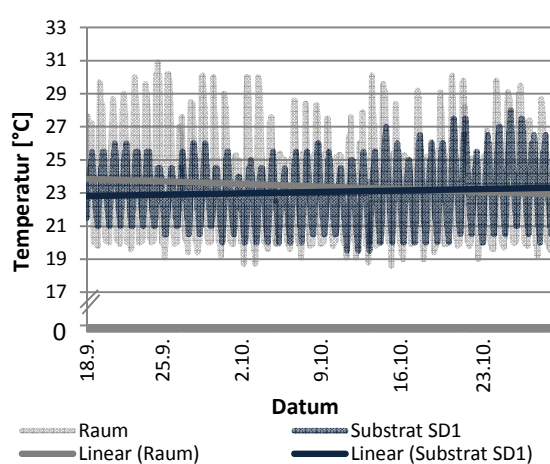


Abb. 4.11: Temperaturverlauf in der Raumluft und im Substrat des unbewässerten Pflanzmoduls S-Mix (= SD 1, 18.9.-29.10.2013)

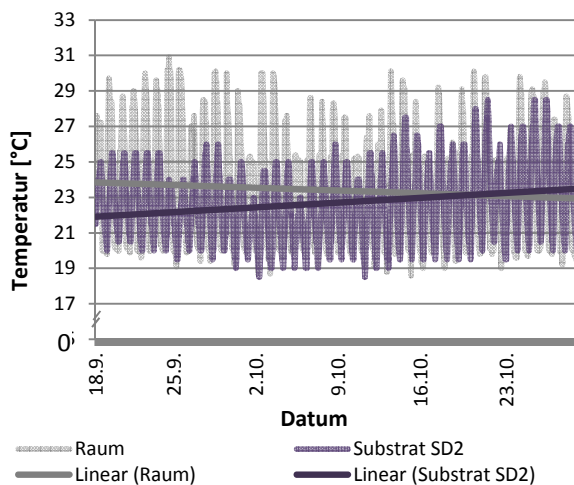


Abb. 4.12: Temperaturverlauf in der Raumluft und im Substrat des unbewässerten Pflanzmoduls S.'WG' (= SD 2, 18.9. - 29.10.2013)

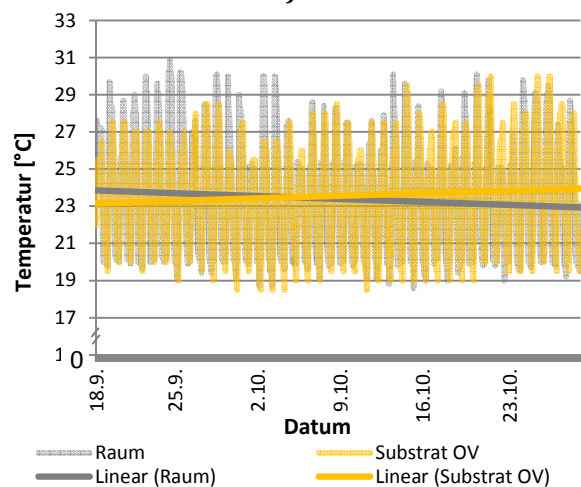


Abb. 4.13: Temperaturverlauf in der Raumluft und im Substrat des unbewässerten Moduls OV (18.9. - 29.10.2013)

#### 4.1.2.5 Pflanzenwachstum und Inhaltsstoffe der Pflanzen bei Kultur im Gewächshaus

Am Versuchsende wurden die Frisch- und Trockenmassen der Pflanzen ermittelt und die Trockensubstanzen bezüglich Inhaltsstoffe analysiert. Da die Kräuter und Gräser - im Gegensatz zum immergrünen *Sedum* - Ende September schon mit dem Einziehen begonnen hatten und deshalb aufgrund geringer Wassergehalte relativ niedrige Frischmassen aufwiesen, wurde nur die vom Wassergehalt unabhängige Trockenmasse ausgewertet (Abb. 4.14). Gemittelt über alle Bepflanzungen hatten die Pflanzen bei Verwendung von Grauwasser rund 10 % weniger Trockenmasse gebildet als beim Einsatz von Leitungswasser. Dieser Unterschied ließ sich sogar statistisch absichern.

Beim Vergleich der verschiedenen Pflanzmodule lag das Modul '20 % Kräuter/80 % Gräser' signifikant an erster Stelle, gefolgt vom Mix aus je 50 % Kräutern und Gräsern. Am geringsten war das Wachstum in der *Sedum*-Variante 'Weihenstephaner Gold' (S. 'WG'). Die beiden anderen Varianten (80K/20G und S.-Mix) nahmen eine Mittelstellung ein.

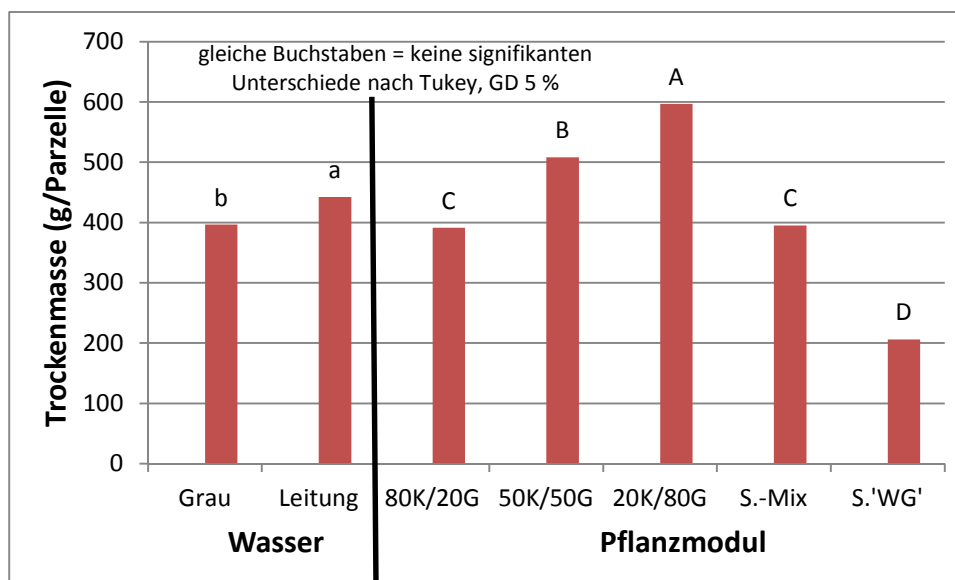


Abb. 4.14: Pflanzentrockenmasse am Versuchsende bei Verwendung unterschiedlicher Gießwässer sowie in den verschiedenen Pflanzmodulen

Bei der Analyse der Trockensubstanz der verschiedenen Pflanzenarten auf Nähr- und Schadstoffe (Tab. 4.5 sowie

Tab. 7.10 und Tab. 7.11) ergaben sich bei gleichem Angebot z.T. stark variierende Gehalte, die sich bis zum Zehnfachen unterschieden.

Ein eindeutiger Einfluss der verschiedenen Gießwässer auf die Gehalte an Inhaltsstoffen in der Pflanzen-TS war nur beim Natrium festzustellen. Hier lagen die Gehalte in den Pflanzen, die mit Grauwasser gegossen wurden, meist wesentlich höher als in den mit Leitungswasser gegossenen. Innerhalb der Grauwasservarianten ergab sich dabei eine große Spannweite.

Bei gleichem Natrium-"Angebot" enthielt *Inula ensifolia* extrem viel, *Euphorbia seguieriana* demgegenüber nur sehr wenig Natrium in der TS. Offensichtlich sind einige Pflanzen wie *Euphorbia seguieriana* bei der Aufnahme von Stoffen in der Lage, Natrium selektiv auszuschließen. *Inula ensifolia* hingegen hat diese Eigenschaft vermutlich nicht und reagiert mit geringem Wachstum auf die hohe Na-Aufnahme (siehe Abb. 3.2).



Tab. 4.5: Na-, Zn-, B- und Al-Gehalte der Pflanzen-Trockensubstanzen am Versuchsende

Pflanz- modul	Pflanzenart	Grauwasser				Leitungswasser			
		Na % TS	Zn mg/kg	B mg/kg	Al mg/kg	Na % TS	Zn mg/kg	B mg/kg	Al mg/kg
80K/20G	<i>Achillea</i>	1,00	42	133	877*	0,10	32	82	70
	<i>Bergenia</i>	0,63	19	90	959	0,13	20	88	438
	<i>Euphorb. pal.</i>	0,36	89	213	134	0,06	59	160	86
	<i>Euphorb. seg.</i>	0,07	16	68	162	0,03	14	62	70
	<i>Geranium</i>	1,27	39	105	664	n.b.	36	118	276
	<i>Hemerocallis</i>	0,84	43	109	799	0,13	44	104	993
	<i>Inula</i>	2,15	64	214	520	0,28	65	166	57
	<i>Sanguisorba</i>	0,33	38	147	396	0,04	39	183	63
	<i>Briza</i>	1,24	28	109	612	0,15	27	66	61
	<i>Carex buch.</i>	0,36	23	28	57	0,06	21	20	27
50K/50G	<i>Achillea</i>	0,64	46	119	477	0,20	31	100	386
	<i>Bergenia</i>	0,82	23	123	374	0,10	22	86	142
	<i>Euphorb. pal.</i>	0,31	81	222	193	0,06	63	174	74
	<i>Euphorb. seg.</i>	0,09	20	77	118	0,02	16	61	95
	<i>Sanguisorba</i>	0,24	34	185	157	0,05	31	240	135
	<i>Briza</i>	1,06	33	100	1273	0,14	28	65	153
	<i>Carex buch.</i>	0,31	20	17	64	0,06	22	16	92
	<i>Carex flacca</i>	0,68	32	74	811	0,11	32	52	703
20K/80G	<i>Euphorb. pal.</i>	0,31	120	185	112	0,05	75	206	66
	<i>Euphorb. seg.</i>	0,09	20	65	141	0,02	20	70	98
	<i>Briza</i>	0,95	31	100	572	0,19	25	80	165
	<i>Carex buch.</i>	0,46	21	29	66	0,06	20	17	23
	<i>Carex flacca</i>	0,81	27	67	563	0,10	35	51	565
S.-Mix	<i>Sedum flor. /Mix</i>	0,31	44	95	1720	0,05	40	85	2187
	<i>Sedum spurium</i>	0,23	44	60	431	0,09	46	58	124
S. 'WG'	<i>Sedum flor. 'WG'</i>	0,39	44	88	885	0,10	45	81	782
<b>Mittelwert</b>		0,61	40	109	505	0,09	33	96	n.b.

\* blau/rot = besonders hohe/niedrige Werte

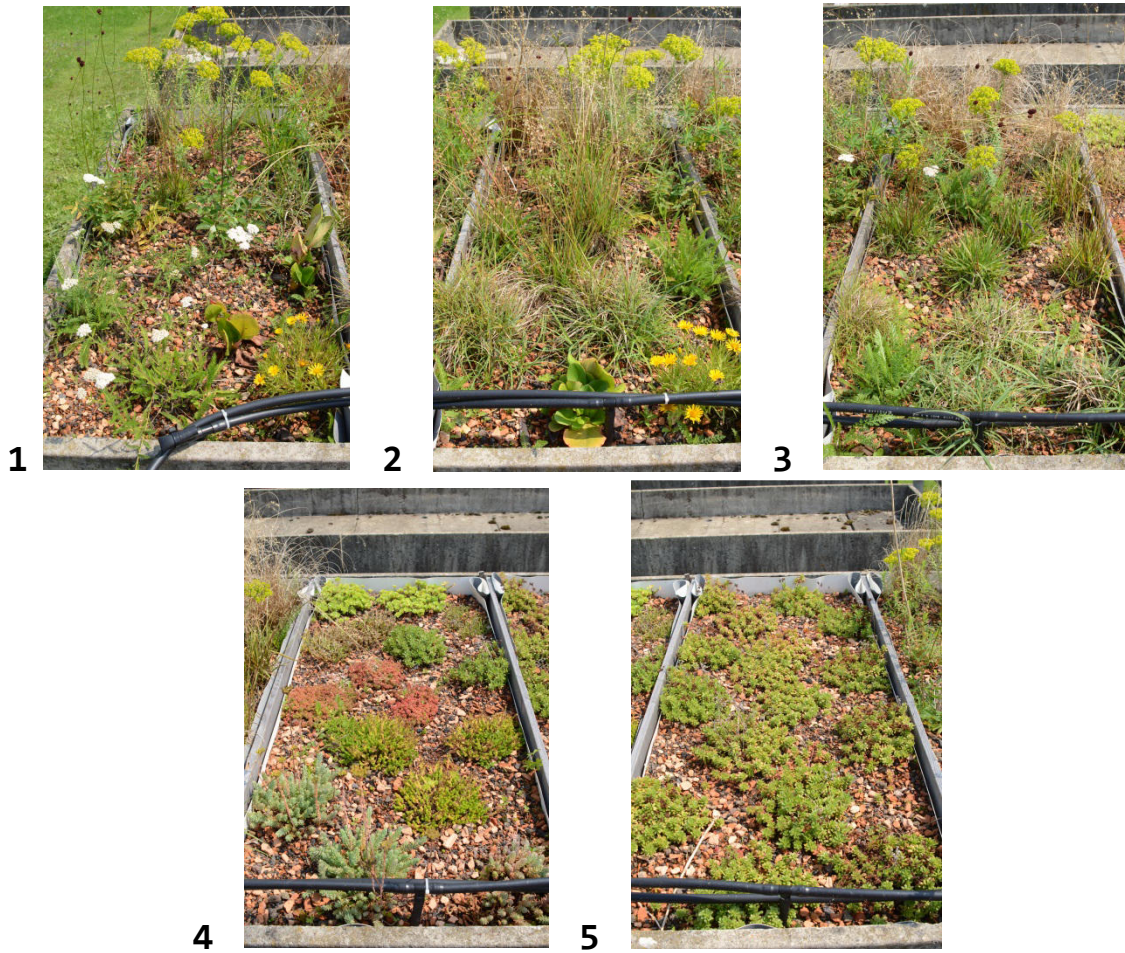
## 4.2 Freiland

### 4.2.1 Angaben zum Versuch

Für den Freilandversuch wurden im Juli 2013 jeweils 1 m<sup>2</sup> große Parzellen auf Betontischen angelegt, unter denen Sickerwasser aufgefangen werden konnte (s. Abb. 4.15 u. Abb. 4.16). Variiert wurden dabei Bepflanzung, Systemaufbau und Gießwasser (Tab. 4.6 sowie Tab. 7.12 und Tab. 7.13). Der Versuch erstreckte sich über zwei Vegetationsperioden bis Oktober 2014, wurde aber darüber hinaus noch weiter beobachtet.



**Abb. 4.15: Freiland-Versuchsflächen des zweiten Pflanzenversuchs kurz nach Versuchsbeginn**



**Abb. 4.16: Pflanzmodule 1-5 (s. Tab. 4.6) in KW 30/14 (= zehn Wochen vor Versuchsende)**

**Tab. 4.6: Versuchsplan "Vegetationsversuch mit Kräuter/Gräser-Mischungen im Vergleich zu herkömmlichen *Sedum*-Bepflanzungen unter Verwendung von Grauwasser - Freiland"**

Variante	Pflanzmodul (jeweils 16 Pflanzen/Parzelle)	Systemaufbau	Gießwasser
1	80 % Kräuter + 20 % Gräser (80K/20G)	FD 25	GW
2	50 % Kräuter + 50 % Gräser (50K/50G)		
3	20 % Kräuter + 80 % Gräser (20K/80G)		
4	100 % <i>Sedum</i> -Mix (S.-Mix)		
5	100 % <i>Sedum floriferum</i> 'Weihenstephaner Gold' (S.'WG')		
6	80 % Kräuter + 20 % Gräser (80K/20G)	AT 45	
7	50 % Kräuter + 50 % Gräser (50K/50G)		
8	20 % Kräuter + 80 % Gräser (20K/80G)		
9	100 % <i>Sedum</i> -Mix (S.-Mix)		
10	100 % <i>Sedum fl.</i> 'Weihenstephaner Gold' (S.'WG')		
11-20	entsprechend 1-10	entspr. 1-10	LW

## 4.2.2 Ergebnisse

### 4.2.2.1 Menge und Qualität des Drainwassers

Aufgrund der witterungsbedingt nur geringen Zusatzbewässerung (insgesamt 105 l/m<sup>2</sup> (FD 25) bzw. 122 l/m<sup>2</sup> (AT 45) im Vergleich zu 1.038 l Regenwasser/m<sup>2</sup>, Tab. 4.7) hatte die Grauwasserausbringung fast keine Auswirkung auf die Qualität des Dränwassers. Eine Bilanzierung der Niederschläge plus Bewässerung abzüglich des Dränwassers ergab beim Einsatz von Grauwasser eine verdunstete Wassermenge von 598 l/m<sup>2</sup> (FD25) bzw. 612 l/m<sup>2</sup> (AT45) und bei Verwendung von Leitungswasser entsprechend 574 l/m<sup>2</sup> bzw. 640 l/m<sup>2</sup> (Tab. 4.7).

**Tab. 4.7: Mengen an Niederschlag, Bewässerung und Dränwasser im Freilandversuch**

	1.8. bis 31.12.2013 (l/m <sup>2</sup> )		1.1. bis 3.12.2014 (l/m <sup>2</sup> )	
	FD25	AT45	FD25	AT45
Niederschlag	306		732	
+ Bewässerung	55	62	50	60
- Dränwasser	152 (GW)/165 (LW)	161 (GW)/158 (LW)	393 (GW)/404 (LW)	387 (GW)/362 (LW)
= verdunstet*	209 (GW)/196 (LW)	207 (GW)/210 (LW)	389 (GW)/378 (LW)	405 (GW)/430 (LW)

\* Annahme: Wassergehalte im Substrat zu Versuchsbeginn und -ende gleich

Von den 19 Entnahmeterminen sind hier exemplarisch die Analysenergebnisse der beiden ersten Termine nach drei- bzw. vierfachem Gießen (Tab. 4.8) und im Anhang die der beiden Entnahmetermine nach Ende der Zusatzbewässerung im Jahr 2014 (Tab. 7.14) aufgelistet. Die Werte sind jeweils gemittelt über die fünf verschiedenen Pflanzmodule, wobei die meist nur geringe Spanne zwischen Mittel- und Maximalwert zeigt, dass die Unterschiede zwischen den Modulen nicht sehr groß waren.

Die Konzentration an relevanten Inhaltsstoffen war in allen Varianten relativ niedrig, so dass das Dränwasser in fast allen Parametern Trinkwasserqualität aufwies. Lediglich beim Bor und Arsen sowie z.T. beim NH<sub>4</sub>-N ergaben sich Werte über den entsprechenden Grenzwerten. Außerdem waren beim Na und Cu an mindestens einem Entnahmetermin erhöhte Werte in den Grauwasservarianten im Vergleich zu denen mit Leitungswasser festzustellen. An den folgenden

Entnahmetermenen sanken alle Werte noch weiter ab, da aufgrund von Niederschlägen keine Bewässerung mehr notwendig war.

**Tab. 4.8: Qualität des Drainwassers hinsichtlich pflanzenphysiologischer oder umweltrelevanter Parameter bei Einsatz unterschiedlicher Gießwässer und Systemaufbauten**

Parameter*	12.8.2013**				29.8.2013**		Grenzw. Trinkwasser-VO <sup>2)</sup>
	GW, Var.		LW, Var.		GW Var.	LW Var.	
	1-5 (FD 25)	6-10 (AT 45)	11-15 (FD 25)	16-20 (AT 45)	1-10	11-16	
pH-Wert	8,1/8,3 <sup>1)</sup>	8,3/8,4	7,9/8,0	8,4/8,5	8,1/8,6	8,4/8,6	6,5-9,0
LF (25 °C, µS/cm)	1902/2210	1732/1851	2156/2350	1587/1776	2317/2370	2090/2200	2790
Salz (g/l)	1,00/1,02	0,91/0,98	1,14/1,24	0,84/0,94	1,22/1,29	1,10/1,19	-
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	0,2/1,0	0	0,4/1,0	0,6/2,0	0,2/0,3	0,2/0,3	0,39
NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	2,6/4,8	3,6/5,6	5,4/7,7	4,2/5,4	1,5/2,8	1,5/2,7	11,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/l)	1,9/2,2	1,7/1,8	1,9/2,1	1,5/1,7	0,7/0,8	0,5/0,7	-
K <sub>2</sub> O (mg/l)	57/63	51/55	60/68	46/53	48/57	43/52	-
Mg (mg/l)	57/68	48/52	64/78	46/53	62/70	59/67	-
Ca (mg/l)	402/464	334/346	439/458	319/347	405/428	377/395	-
Na (mg/l)	67/78	74/79	63/75	44/48	91/101	61/74	200
S (mg/l)	430/497	351/365	478/519	320/351	434/460	392/423	-
Fe (µg/l)	21/29	5/7	25/31	6/7	35/60	31/38	200
Cu (µg/l)	6/9	10/11	3/5	2/3	6/14	3/5	2000
Mn (µg/l)	6/12	1/2	6/10	1/1	3/5	2/3	50
Zn (µg/l)	6/6	1/2	6/10	1/1	9/13	11/42	-
B (µg/l)	1207/1298	1033/1068	1214/1251	973/1028	1294/1391	1184/1253	1000
Al (µg/l)	81/95	75/81	82/88	75/81	79/96	97/136	200
As (µg/l)	29/39	30/36	28/30	30/36	26/33	29/39	10
Cr (µg/l)	13/14	12/14	24/26	11/12	24/35	24/27	50
Pb (µg/l)	8/12	8/9	10/14	8/11	9/15	8/13	-
Se (µg/l)	11/15	7/8	13/14	8/11	10/22	13/16	-
V (µg/l)	129/134	146/151	117/119	130/133	122/136	112/123	-
anion. Tenside (mg MBAS/l)	0,3/0,3	0,3/0,5	0,1/0,1	0,1/0,1	0,6/0,9	0,5/0,5	-
nichtio. Ten. (mg TritonX/l)	0,4/0,5	0,3/0,3	n.b.	n.b.	0,6/1,3	0,4/2,6	-

\* Zusätzlich wurden die Gehalte an Ag, Ba, Be, Cd, Co, Hg und Ni gemessen; sie lagen allesamt unterhalb der Nachweisgrenze \*\* vierfaches Gießen mit Grau-/Leitungswasser zwischen dem 19.7. und dem 16.8.13

<sup>1)</sup> jeweils Mittelwert/Maximalwert <sup>2)</sup> [Tvo11]

#### 4.2.2.2 Pflanzenwachstum

Am 26.9.2014, d.h. kurz vor dem Einziehen der Pflanzen, wurde deren Wachstum bonitiert. Erwartungsgemäß war keinerlei Einfluss der Grauwasserausbringung festzustellen. Im Mittel aller Pflanzmodule und der beiden unterschiedlichen Systemaufbauten betrug die Boniturnote (1 = schlechteste, 7 = beste Note) bei beiden Gießwässern 3,7. Ebenso hatte der unterschiedliche Systemaufbau aufgrund der witterungsbedingten minimalen Bewässerung mit

Grauwasser keine signifikanten Auswirkungen. Hier ergaben sich Boniturnoten von 3,6 (FD 25) bzw. 3,8 (AT 45).

#### 4.2.2.3 Verdunstungsmessung

An vier besonders heißen Augusttagen im Jahr 2015 (mittlere Temperaturen zwischen 23,4 und 25,1 °C) erfolgte eine im Anhang (Tab. 7.15) näher beschriebene Verdunstungsmessung in jeweils zwei Parzellen der mit Leitungswasser gegossenen Varianten 11 bis 15 (Systemaufbau FD25). Dabei hatte die Bepflanzung mit *Sedum* 'Weihenstephaner Gold' im Vergleich zu der vom Wetterdienst für den Freisinger Standort an diesen Tagen ermittelten Standardverdunstung eine leichte und die *Sedum*-Mix-Bepflanzung eine etwas stärkere Steigerung der Verdunstung zur Folge (Abb. 4.17, dargestellt sind jeweils Mittelwerte der zwei Wiederholungen). In den drei Kräuter/Gräser-Mischungen war die Verdunstung - unabhängig von deren Zusammensetzung - nochmals um rund 30 % höher als in den *Sedum*-Varianten und damit um gut 60 % höher als die Standardverdunstung.

Mit etwa 7,5 l/m<sup>2</sup> und Tag wurden von den Kräuter/Gräser-Mischungen im Freiland höhere Verdunstungsraten als im Gewächshaus (siehe Abb. 4.4 und Abb. 4.5) erzielt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Verdunstung im Gewächshaus wegen niedrigerer Einstrahlung und höherer Luftfeuchte grundsätzlich etwas geringer ist als im Freiland. Zudem war der Pflanzenbestand ein Jahr älter und damit besser etabliert als 2014 und die Messung erfolgte an vier besonders heißen Tagen. Der Sommer 2015 war generell heiß und trocken, so dass die sonstige Vegetation, im Gegensatz zur bewässerten Dachbegrünung, schon sehr gelitten hatte und vielfach vertrocknet war.

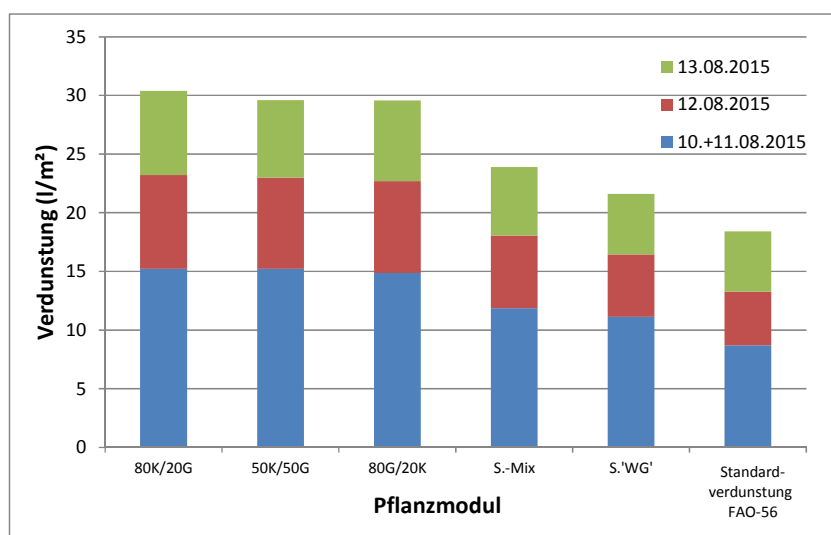


Abb. 4.17: Verdunstung in den verschiedenen Pflanzmodulen im August 2015 im Freiland im Vergleich zur Standardverdunstung FAO 56 (Standort Freising)

#### 4.2.2.4 Pflegeaufwand

Der Pflegeaufwand ist ein wichtiger ökonomischer Parameter, der einen wesentlichen Einfluss auf die Akzeptanz unterschiedlicher Dachbegrünungen hat. Im Versuch wurden jeweils im September 2014 und 2015 Beikräuter und sonstige parzellenfremde Pflanzen entfernt und die Dachbegrünungspflanzen fachgerecht zurückgeschnitten (außer die immergrünen *Bergenia*

und *Euphorbia*). Dabei hatten weder die unterschiedlichen Gießwässer noch die Systemaufbauten einen signifikanten Einfluss auf den Pflegeaufwand, sondern allein die Zusammensetzung der Pflanzmodule. 2014 war der Aufwand in den *Sedum*-Parzellen signifikant geringer als in den drei Kräuter/Gräser-Mischungen (Abb. 4.18).

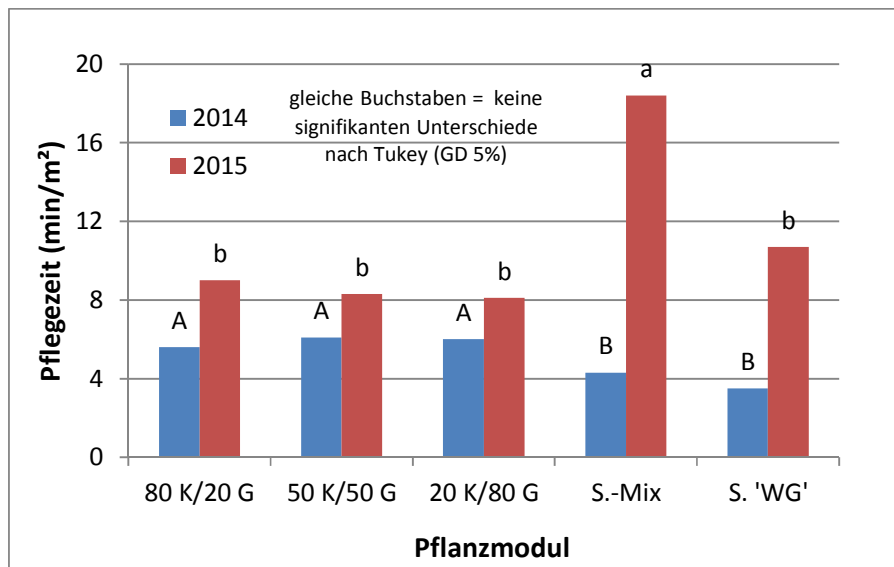


Abb. 4.18: Pflegeaufwand der unterschiedlichen Pflanzmodule

Im zweiten Jahr jedoch war es genau umgekehrt. In den Parzellen mit den Kräuter/Gräser-Mischungen wurde weniger Zeit als in den *Sedum*-Parzellen benötigt. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Kräuter (z.B. *Achillea*) z.T. stark aussamten und diese Sämlinge nur in den *Sedum*-Varianten als parzellenfremd entfernt werden mussten. Zudem war der Be-deckungsgrad in den *Sedum*-Parzellen vergleichsweise niedriger als in den Varianten mit den konkurrenzstärkeren Kräuter/Gräser-Mischungen, so dass bei Bepflanzung mit *Sedum* mehr Beikräuter anfliegen und sich gut entwickeln konnten.

Dass der *Sedum*-Mix am signifikant pflegeaufwändigsten war lag daran, dass er *Sedum*-Arten enthielt, die - im Gegensatz zu *Sedum* 'Weihenstephaner Gold' - Teppiche bildeten (wie z.B. *Sedum acre*), aus denen Sämlinge nur schwer zu entfernen waren.

Grundsätzlich ist zu sagen, dass die Pflege von *Sedum*-Flächen mit Bewässerung im Vergleich zu unbewässerten Flächen wesentlich aufwendiger ist, da Beikräuter mit Bewässerung Trockenperioden gut überleben, in denen sie ohne Bewässerung abgestorben wären.

Außerdem sind die ermittelten Pflegezeiten in ihrer absoluten Höhe nicht 1:1 in die Praxis übertragbar. Erschwerend wirkte sich unter Versuchsbedingungen aus, dass Pflege und Beikrautjäten nur von Hand möglich waren und dass der Beikrautdruck in den relativ kleinen, direkt nebeneinander liegenden Parzellen, zudem in Bodennähe, besonders hoch war. In der Praxis lässt sich die Pflege maschinell durchführen. Allerdings muss das Pflegegut vom Dach herunter befördert und in eine Grünschnittsammelstelle gefahren werden. Zudem sind Beikräuter ein geringeres, Gehölzsämlinge dafür aber ein umso größeres Problem.

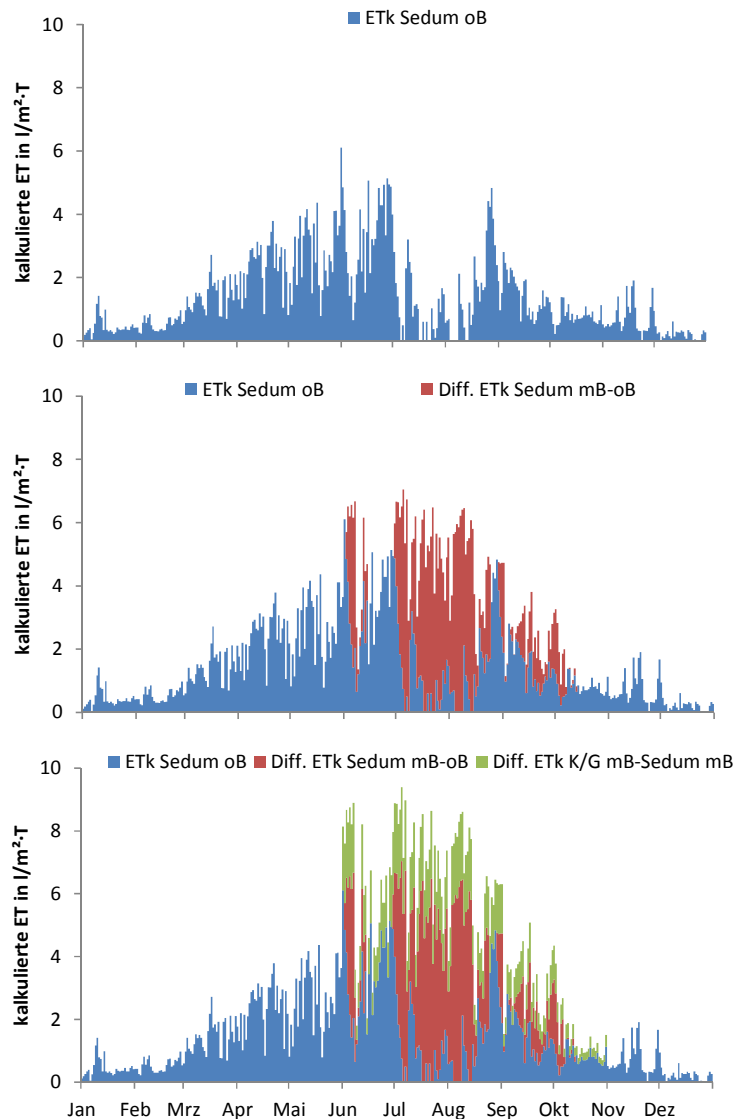
## 5 Bewertung der Ergebnisse

### 5.1 Ökologische Bewertung

Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich, dass durch eine zusätzliche Bewässerung die Evapotranspiration und damit einhergehend die Kühlleistung von extensiven Dachbegrünungen mit *Sedum* signifikant gesteigert werden kann. Während es bei maximaler Wasserspeicherung zu einer erheblichen Evapotranspiration kommt, geht diese mit zunehmendem Trockenstress stark zurück (Abb. 4.7). Bei guter Wasserversorgung erreicht eine etablierte *Sedum*-Begrünung während der Vegetationsperiode eine Evapotranspiration in Höhe der FAO-56-Referenzverdunstung oder sogar noch leicht darüber (Abb. 4.5, Abb. 4.17). Allerdings ist in Abb. 4.5 auch zu erkennen, dass die Evapotranspiration einer ausreichend bewässerten *Sedum*-Begrünung nur etwa 15 bis 30 % größer ist als die Evaporation des Dachsubstrats ohne Vegetation. Wolf und Lundholm [WL08] sowie Coutts et al. [CT13] berichten über vergleichbare Ergebnisse, wobei die Evaporation des Substrats z.T. sogar die Evapotranspiration der *Sedum*-Begrünung überschritt. Ursächlich für diese hohe Evaporation sind eine starke Erwärmung auf Grund der geringen Albedo sowie die stark zerklüftete Oberfläche und die fortlaufende Wassernachlieferung durch kapillaren Aufstieg [ML11a, CT13].

Auf Basis der Messungen mit den unbewässerten *Sedum*-Modulen in der Tageslichtkammer (Abschnitt 4.1) wurde ein Modell für die Abnahme der Evapotranspiration in Abhängigkeit vom volumetrischen Wassergehalt des Substrats erstellt. Dabei zeigte sich ein starker Rückgang der Evapotranspiration, wenn der Wassergehalt im Substrat unter 45 % der maximalen Wasserkapazität fiel. Des Weiteren wurde auf Grundlage der Messungen im Gewächshaus (Abb. 4.5) bzw. v.a. im Freiland (Abb. 4.17) angenommen, dass eine ausreichend mit Wasser versorgte *Sedum*-Begrünung von Juni bis August eine Evapotranspiration aufweist, die um 20 % höher ist als die FAO-56-Referenzverdunstung. Bei der Kräuter/Gräser-Begrünung wurde mit einem Anstieg um 60 % kalkuliert. Mit diesen Werten wurde auf Basis der Klimadaten für 2015 am Standort Freising die Evapotranspiration einer unbewässerten *Sedum*-Begrünung, wie sie derzeit Standard ist, und einer *Sedum*-Begrünung bzw. einer Begrünung mit einer Kräuter/Gräser-Mischung, die kontinuierlich bewässert wird, berechnet. Aus Abb. 5.1 wird deutlich, dass die *Sedum*-Begrünung ohne Bewässerung auf Grund von Wassermangel im gesamten Zeitraum von Mai bis Oktober nur einen Bruchteil der bei ausreichender Wasserversorgung möglichen Evapotranspiration erzielt. Dementsprechend gering ist in diesem Fall auch die Kühlleistung. Während im Falle der unbewässerten *Sedum*-Begrünung von Juni bis August nur ca. 25 % der Globalstrahlung von 530 kWh/m<sup>2</sup> in latente Wärme umgewandelt werden, sind es mit Bewässerung bereits ca. 56 %. Bei einer Kräuter/Gräser-Vegetation kann der Wert sogar auf 75 % gesteigert werden.

Neben dem Kühleffekt durch die Umwandlung von sensibler in latente Wärme sind bei der Betrachtung der Gesamtkühlleistung einer Dachbegrünung noch drei weitere Punkte zu berücksichtigen: Zum ersten die höhere Albedo der Vegetation von ca. 0,20 im Vergleich zu einer dunklen Dachfläche [ML11b], zum zweiten die sehr hohe langwellige Rückstrahlung [GB06, FZ10, ML11a] und zum dritten die Umsetzung von Strahlungsenergie in Biomasse durch die Photosynthese [FZ10, H]10].



**Abb. 5.1:** Kalkulierte Evapotranspiration ( $ET_k$ ) einer unbewässerten *Sedum*-Begrünung (oB), die Differenzen der  $ET_k$  einer *Sedum*-Begrünung mit und ohne Bewässerung (Diff  $ET_k$  *Sedum* mB-oB) sowie die Differenzen der  $ET_k$  einer Kräuter/Gäser-Vegetation und einer *Sedum*-Begrünung jeweils mit Bewässerung (Diff  $ET_k$  K/G mB - *Sedum* mB) am Standort Freising für das Jahr 2015

Unter Berücksichtigung all dieser Faktoren kalkulieren Feng et al. [FZ10] für eine optimal versorgte und gut etablierte *Sedum*-Begrünung eine Energiebilanz, bei der nur 1,2 % der eingestrahlten Energie zu einer Erwärmung der Pflanzen bzw. des Substrats beitragen. Damit ist die Kühlleistung eines kontinuierlich bewässerten Gründachs mit Sicherheit vergleichbar oder sogar größer als die Kühlleistung eines Cool Roofs, die auf einer Maximierung der Albedo beruht [GB06, CT13].

Gründächer bieten im Vergleich zu Cool Roofs neben der Kühlwirkung noch weitere ökologische Vorteile: So stellen begrünte Dachflächen einen wichtigen Lebensraum für Insekten und Vögel im verdichteten innerstädtischen Bereich dar [OR07], wobei der ökologische Wert einer Dachbegrünung mit der Diversität der Vegetation zunimmt. Da der erste Projektabschnitt gezeigt hat, dass eine Vielzahl von Pflanzen eine intensive Bewässerung mit Grauwasser tolerieren, bietet sich die Möglichkeit, den ökologischen Wert bestehender *Sedum*-Begrünungen durch die Neuetablierung von Gräsern und Kräutern sowie eine Bewässerung zu steigern. Neben ihrer Bedeutung als Lebensraum steigern sichtbare Dachbegrünungen auch das Wohlbefinden der



Stadtbevölkerung und haben zusätzlich zu diesem mehr psychologischen Effekt zusätzlich noch einen weiteren gesundheitlichen Nutzen durch die Bindung von Luftschadstoffen [NA10].

Die Rückhaltung von Niederschlagswasser und damit die Entlastung der Abwassersysteme bei Starkregenereignissen [OR07] als zweiter wichtiger ökologischer Wert von Dachbegrünungen stellt im ersten Augenblick einen Gegensatz zur Erhöhung der Kühlleistung durch eine fortlaufende Bewässerung dar: Um eine hohe Verdunstungsleistung erzielen zu können, ist ein ausreichend hoher Wassergehalt des Substrats notwendig, d.h. die Speicherkapazität für Niederschlagswasser ist reduziert. Dieses Problem kann allerdings durch eine intelligente Bewässerungssteuerung stark vermindert werden. Da die maximale Verdunstungsleistung nur in länger anhaltenden Hitzeperioden benötigt wird, muss auch nur in solchen Zeiten der Wassergehalt im Substrat sehr hoch gehalten werden. Ansonsten kann er entsprechend niedriger liegen. Zukünftig wäre es sogar denkbar, den Wassergehalt im Substrat über Sensoren zu erfassen und in Abhängigkeit von der Niederschlagswahrscheinlichkeit gezielt zu regulieren. Des Weiteren wird auch für das Grauwasser ein gewisses Maß an Speicherkapazität benötigt [FBR05], die für die Starkregenerückhaltung genutzt werden kann, indem der Speicher vor dem Eintreten eines Starkregenereignisses geleert wird.

Da zudem die Verdunstungsleistung insbesondere von Kräuter/Gräser-Vegetationen im Vergleich zum Wasserspeichervermögen des Systems (Substrat plus eventuelle Speicherelemente) sehr hoch ist (Kräuter/Gräser-Vegetationen verdunsten zwischen 6 und 8 l je m<sup>2</sup> und Tag bei einem maximalen Speichervolumen des Systems von 45 bzw. 59 l/m<sup>2</sup>), wird der Wasservorrat ohne Bewässerung innerhalb weniger Tage stark reduziert. Bei Begrünungen mit einer hohen Verdunstungsleistung und einer intelligenten Bewässerungssteuerung sollte daher eine Steigerung der insgesamt zurückgehaltenen Niederschlagsmenge über die bisher bei Extensivbegrünungen üblichen 50 bis 60 % hinaus möglich sein.

Ein weiterer Aspekt bei der Beurteilung der Wasserrückhaltung und der Entlastung der Abwassersysteme ist die Nutzung von Grauwasser an sich, da dieses Wasser nicht mehr die Kläranlagen belastet. Im Falle der oben gezeigten Kalkulation werden durch die Bewässerung einer *Sedum*-Begrünung allein im Zeitraum von Juni bis August ca. 250 l Wasser je m<sup>2</sup> mehr verdunstet. Bei einer begrünten Dachfläche von 100 m<sup>2</sup> sind dies 25 m<sup>3</sup> Wasser. Dies entspricht in etwa dem nutzbaren Grauwasseranfall eines Fünf-Personen-Haushalts im gleichen Zeitraum [FBR05]. Bei einer verdunstungsstärkeren Gräser-Kräuter-Vegetation kann diese Menge bis auf 40 m<sup>3</sup> gesteigert werden.

## 5.2 Ökonomische Bewertung

Bei der ökonomischen Betrachtung sind außer den Pflegekosten die höheren Kosten für die Installation der Dachbegrünung zu berücksichtigen. Im Folgenden soll deshalb die erzielbare Kühlleistung je eingesetztem Euro Installations- und Pflegekosten folgender Systeme verglichen werden:

- klassische als Trockenstandort konzipierte *Sedum*-Begrünung
- bewässerte *Sedum*-Begrünung
- verdunstungsmaximiertes Gründach mit Kräuter/Gräser-Vegetation
- Dach mit einer Abdeckung mit hoher Albedo ("Cool Roof").

Die ökonomische Bewertung ist als grobe Abschätzung zu verstehen, da sich je nach Gebäudetypologie deutlich unterschiedliche Werte ergeben können. Außerdem sind die Komponenten des verdunstungsmaximierten Gründaches derzeit nur aus Kleinserien erhältlich. Bei großflächiger Anwendung ist eine entsprechende Preisreduktion zu erwarten.

Da unabhängig vom Systemaufbau die Abdichtung des Flachdachs in der Regel ohnehin bereits eine Wurzelfestigkeit aufweist bzw. diese bei rechtzeitiger Berücksichtigung bei der Planung keine Mehrkosten verursacht, soll dieser Punkt bei der ökonomischen Bewertung nicht weiter berücksichtigt werden. Gleiches gilt für die Tragkonstruktion, weil die Lastaufnahme eines verdunstungsmaximierten Gründachs nur geringfügig größer ist wie bei herkömmlichen extensiven Begrünungen oder unbegrünten Kiesdächern und damit an die Tragkonstruktion keine wesentlich erhöhten Anforderungen zu stellen sind.

Der derzeitige Standard bei Dachbegrünungen in gemäßigten Klimaten ist eine als Trockenstandort konzipierte *Sedum*-Begrünung ohne Bewässerung. Hierfür fallen, bei einer angenommenen Gesamtdachfläche von 1000 m<sup>2</sup> (jeweils ohne Berücksichtigung von Anschlüssen und Randstreifen sowie besonderen Einbaubedingungen und ohne Baustellenlogistik sowie Arbeitsvorbereitung), Material- und Arbeitskosten (auf Basis eines Stundenlohns von 40,- Euro, der auch für die Pflegekosten angesetzt wurde) in Höhe von ca. 24,50 €/m<sup>2</sup> (Details des zu Grunde liegenden Systemaufbaus und zur Kalkulation der Material- und Arbeitskosten finden sich im Anhang unter Abschnitt 7.3). Um die Verdunstungsleistung zu steigern, ist eine kontinuierliche Bewässerung notwendig. Sie erfolgt bei bewässerten *Sedum*-Begrünungen über Tropfschläuche, die auf Grund der geringen Querverteilung des Wassers im Substrat sehr engräumig verlegt werden müssen. Dies verursacht zusätzliche Material- und Arbeitskosten in Höhe von ca. 13,50 €/m<sup>2</sup>. Für ein verdunstungsmaximiertes Gründach mit einer Kräuter/Gräser-Vegetation ist ein etwas aufwendigerer Unterbau notwendig und im Gegensatz zur Sprossenaussaat werden in diesem Fall zweckmäßigerweise Flachballenpflanzen ausgepflanzt. Gleichzeitig können die Tropfschläuche in einem etwas größeren Abstand verlegt werden. In Summe ergeben sich so Kosten für die Installation von ca. 69,- €/m<sup>2</sup>. Dies entspricht einer Kostensteigerung von ca. 44,50 €/m<sup>2</sup> im Vergleich zur klassischen *Sedum*-Begrünung und in Höhe von ca. 31,- €/m<sup>2</sup> zur bewässerten *Sedum*-Begrünung.

Neben dem höheren Aufwand für die Installation eines bewässerten Gründachs ist auch der höhere Aufwand für die Pflege zu beachten. Zum einen muss die Bewässerungsanlage regelmäßig überprüft und gewartet werden und zum zweiten steigt der Pflegeaufwand für die Vegetation. Da bei der bewässerten *Sedum*-Begrünung unerwünschter Aufwuchs nicht wie bei unbewässerten Extensivbegrünungen in Trockenperioden abstirbt, ist mit einem erhöhten Pflegeaufwand zu rechnen. Dieser zeigte sich auch im abgeschlossenen Forschungsprojekt im Freilandversuch, bei dem im niederschlagsarmen Sommer 2015 in den beiden *Sedum*-Begrünungen Sämlinge verschiedenster Pflanzengattungen aufliefen und sich etablierten. Bei der Kräuter/Gräser-Vegetation ist der Aufwand für das Entfernen von unerwünschtem Aufwuchs auf Grund der größeren Konkurrenzstärke der Vegetation geringer. Gleichzeitig muss die Vegetation im Herbst aber abgemäht und das Mähgut abgefahren werden. Auf Basis von Erfahrungswerten wird für eine unbewässerte *Sedum*-Begrünung mit jährlichen Pflegekosten von ca. 1,40 €/m<sup>2</sup> gerechnet. Bei der bewässerten *Sedum*-Begrünung steigt dieser Wert auf ca. 4,60 €/m<sup>2</sup> und bei der verdunstungsmaximierten Kräuter/Gräser-Vegetation liegt er bei ca. 3,30 €/m<sup>2</sup>.

Hinzu kommen bei Bewässerung mit Grauwasser noch die Kosten für ein System zu dessen getrennter Erfassung und Aufbereitung. Da sich diese Anlagen aber alleine durch die Einsparung bei den Wasser- und Abwassergebühren durch den Ersatz von Trinkwasser insbesondere für die Toilettenspülung innerhalb weniger Jahre amortisieren [Nol05] und dieser Nutzen auch weiterbesteht, da nur ein Teil des Grauwassers während der Sommermonate zur Bewässerung der Dachbegrünung genutzt wird, werden diese Kosten hier außer Acht gelassen.

Bei einer angenommenen Lebensdauer des Gründachs von 50 Jahren und der Bewässerungseinheit von 12 Jahren sind an jährlichen Kosten (Material- und Arbeitskosten für Installation und Pflege) für eine klassische *Sedum*-Begrünung ca. 1,90 €/m<sup>2</sup>, für eine bewässerte *Sedum*-Begrünung ca. 5,95 €/m<sup>2</sup> und für ein verdunstungsmaximiertes Gründach mit einer Kräuter/Gräser-Vegetation ca. 5,30 €/m<sup>2</sup> anzurechnen. Für die Sommermonate 2015 ergibt sich unter den klimatischen Bedingungen am Standort Freising damit eine Kühlleistung durch Evapotranspiration und Albedo von 127 (unbewässerte *Sedum*-Begrünung), 68 (bewässerte *Sedum*-Begrünung) bzw. 95 (Kräuter/Gräser-Vegetation) kWh je Euro Installations- und Pflegekosten.

Zum Vergleich: Bei der Erstinstallation eines Cool Roofs sind die Mehrkosten für die Installation im Vergleich zu einer herkömmlichen wurzelfesten Abdichtung zu vernachlässigen [BC12]. Allerdings ist bei einem solchen System von einer deutlich geringeren Lebensdauer auszugehen, da das Material direkten Witterungseinflüssen ausgesetzt ist. Die Kosten für eine Sanierung (erneute Flüssigabdichtung mit Farbe), die laut Erfahrungen aus der Praxis alle zehn Jahre vorgenommen werden muss, taxieren Boixo et al. [BC12] auf 10,- €/m<sup>2</sup> (Material- und Arbeitskosten). Hinzu kommen Kosten für die regelmäßige Reinigung. Aufgrund von ersten Praxiserfahrungen wird von einem Zeitbedarf von etwa 1 min/m<sup>2</sup> pro Jahr ausgegangen, was jährlichen Kosten von ca. 0,65 €/m<sup>2</sup> entspricht. Zusätzlich ist laut Befragung von Dachdeckerunternehmen im Kalkulationszeitraum von 50 Jahren bei dieser offen liegenden Dachabdichtung eine einmalige Komplettsanierung der Dachabdichtung (auch der An- und Abschlüsse) fällig, die sehr kostspielig ist (siehe Tab. 7.19) und bei einem schützenden Gründach entfällt. Die Albedos der modernen Abdichtungsmaterialien für Cool Roofs liegen bei über 0,85 [San14]. Aufgrund einer zunehmenden Aufrauung und Vergrauung der Oberfläche sowie einer temporären Verschmutzung ist aber über die gesamte Lebensdauer von einer mittleren Albedo von nur 0,5 bis 0,6 auszugehen [AR09, SR14]. Aus diesen Rahmenbedingungen errechnet sich für ein Cool Roof im oben für die drei Gründachsysteme beschriebenen Zeitraum eine Kühlleistung von rund 131 kWh je investiertem Euro Installations- und Pflegekosten. Aus streng ökonomischer Sicht scheint damit auf den ersten Blick das Cool Roof die beste Alternative zur Minderung innerstädtischer Hitzeinseln zu sein. Doch muss seine Leistungsfähigkeit besonders während heißer Perioden hinterfragt werden. Wie zahlreiche Untersuchungen belegen [FH06, GE11, DR13], ist die menschliche Mortalität in längeren Hitzeperioden stark erhöht und damit die Kühlleistung besonders bedeutsam. Hier hat das verdunstungsmaximierte Gründach seine größten Vorteile. Kann es bereits im Durchschnitt (basierend auf den Freisinger Witterungsdaten) der Juni- bis Augusttage 2015 fast die komplette Globalstrahlung kompensieren (504 von 530 kWh/m<sup>2</sup> im Vergleich zu lediglich 290 kWh/m<sup>2</sup> beim Cool Roof), werden seine Vorteile an vier extrem trocken-heißen Augusttagen besonders deutlich: Beim unbewässerten *Sedum*-Dach betrug die Kühlleistung während dieser Tage nur 1,22 kWh/m<sup>2</sup>·T, beim bewässerten *Sedum*-Dach 4,64 kWh/m<sup>2</sup>·T, beim verdunstungsmaximierten Gründach 5,80 kWh/m<sup>2</sup>·T und beim Cool Roof 3,36 kWh/m<sup>2</sup>·T. Der Hauptvorteil eines verdunstungsmaximierten Gründachs liegt also in der

Reduktion von Hitzepeaks, wie sie in Zukunft wohl immer öfter auftreten werden. Hinzu kommt, dass in solchen längeren trocken-heißen Perioden die Verdunstung und damit die stadtklimatische Wirkung der sonstigen grünen Infrastruktur (z.B. Straßenbäume, öffentliche und private Grünflächen) aufgrund zunehmenden Wassermangels stark zurückgeht.

Darüber hinaus ergeben sich für das verdunstungsmaximierte Gründach weitere Vorteile, die nur zum Teil monetär fassbar sind. So hat die Grauwassernutzung eine Reduzierung der Abwassermenge und damit niedrigere Abwassergebühren zur Folge. In fast allen Kommunen führen Gründächer zudem als nichtversiegelte Fläche zu meist wesentlich niedrigeren Abgaben für das Niederschlagswasser. Nicht direkt finanziell quantifizierbar sind außerdem ökologische (hohe ökologische Wertigkeit von Kräuter/Gräser-Vegetationen) sowie gesellschaftliche Vorteile ("Wohlfühlfaktor" von Gründächern) von begrüntem Dächern [NA10]. In diesem Zusammenhang ist auch darauf hinzuweisen, dass Cool Roofs blenden und daher für das menschliche Auge sehr unangenehm sind. Aus diesem Grund ist die Installation in der Einflugschneise von Flughäfen kritisch zu sehen [Liu05].

Damit erweist sich die Realisierung von Dachbegrünungen sicherlich als der weitaus nachhaltigere Ansatz im Vergleich zu Cool Roofs. Dieser Tatsache Rechnung tragend, wird die Anlage von Gründächern von manchen Kommunen (z.B. Bremen, Hamburg oder München) inzwischen schon finanziell gefördert.

### 5.3 Fazit und Ausblick

Der Eintrag pflanzenschädigender Stoffe mit Reinigungs- und Waschmitteln ist meist nur gering, so dass die Qualität des Leitungswassers nicht übermäßig verschlechtert wird. Grauwasser aus Bad und Waschmaschine sind damit prinzipiell zur Bewässerung von extensiv begrüntem Dächern geeignet, soweit die Leitungswasserqualität nicht einer pflanzenbaulichen Verwendung entgegensteht. Durch die Nutzung von Grauwasser ist daher eine kontinuierliche, ressourcenschonende Wasserversorgung großflächiger, extensiver Dachbegrünungen möglich. Diese können folglich nicht nur wie bisher üblich als Trockenstandort mit *Sedum*-Begrünung konzipiert, sondern mit ökologisch wertvolleren und verdunstungsstärkeren Kräuter/Gräser-Mischungen bepflanzt werden. Solche verdunstungsmaximierten Gründächer erbringen bei trocken-heißer Witterung eine höhere Kühlleistung und können zur Verbesserung des Stadtklimas beitragen.

Als nächster Schritt sollten verdunstungsmaximierte Gründächer mit Kräuter/Gräser-Mischungen im Rahmen von Forschungsansätzen wie der Hamburger Gründachstrategie (BMUB-FKZ: 03DAS032A/B) unter Praxisbedingungen erprobt werden. Neben technischen Fragen, z.B. bezüglich einer intelligenten, witterungsabhängigen Bewässerungssteuerung oder zu notwendigen Pflegemaßnahmen, sollte die auf Basis der bisherigen Versuchsergebnisse kalkulierte Kühlleistung unter Praxisbedingungen validiert sowie das Wasserrückhaltevermögen und die ökologische Wertigkeit (z.B. bezüglich der Biodiversität von Insekten) genauer ermittelt werden. Diese Ergebnisse könnten in ein gezieltes Fördersystem für diesen neuartigen Gründachtyp einfließen.

## 6 Literatur

- [Ans10] ANSEL, W., DEUTSCHER DACHGÄRTNERVERBAND E.V.: „Leitfaden: Dachbegrünung für Kommunen - Nutzen, Fördermöglichkeiten, Praxisbeispiele“, DBU-Forschungsantrag, AZ 28269-23, 2010
- [AR09] AKBARI, H., MENON, S., ROSENFELD, A.: Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO<sub>2</sub>. *Climatic Change* 94, 275-286, 2009
- [AS98] ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M.: Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rom, 300(9), 1998
- [Aus02] AUSTRALIAN GOVERNMENT, DEPARTMENT OF HEALTH AND AGEING: Draft Guideline for the Reuse of Greywater in Western Australia, 2002
- [BC12] BOIXO, S., DIAZ-VICENTE, M., COLMENAR, A., CASTRO, M.A.: Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. *Energy*, 38, 425-438, 2012
- [Bet10] BETTIN, A.: Kulturtechniken im Zierpflanzenbau. Ulmer Verlag, 2010
- [Bun08] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Beschluss des Bundeskabinetts vom 17.12.2008
- [DR13] DEPIETRI, Y., WELL, T., RENAUD, F.G.: Social vulnerability assessment of the Cologne urban area (Germany) to heat waves: links to ecosystem services. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 6, 98-117, 2013
- [CT13] COUTTS, A.M., DALY, E., BERINGER, J., TRAPPER, N.J.: Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and Environment* 70, 266-276, 2013
- [Dür95] DÜRR, A.: *Dachbegrünung: ein ökologischer Ausgleich*. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1995
- [Epa04] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA): EPA/625/R-04/108 Guideline for water reuse, Washington DC, 2004
- [Eur06] EUROPÄISCHE UNION: Guideline 2006/7EC of the European parliament and of the council. 15. February 2006 concerning the management of bathing and water quality, 2006
- [FH06] FOUILLET, A., REY, G., LAURENT, F., PAVILLION, G., BELLEC, S., GUIHENNEUC-JOUYAU, C., CLAVEL, J., JOUGLA, E., HEMON, D.: Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 80, 16-24, 2006
- [FBR05] FACHVEREINIGUNG BETRIEBS- UND REGENWASSERNUTZUNG E. V. (fbr), Darmstadt: Grauwasser-Recycling, Planungsgrundlagen und Betriebshinweise. Hinweisblatt H 201, 2005
- [FBR09] FACHVEREINIGUNG BETRIEBS- UND REGENWASSERNUTZUNG E. V. (fbr), Darmstadt: Grauwasser-Recycling auf dem Weg zum Standardelement in der Haustechnik. fbr-Wasserspiegel, Darmstadt, Januar 2009
- [FLL96] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E. V. (FLL): Bewertung von Dachbegrünungen, Bonn, 1996

- [FLL08] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E. V. (FLL): Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen, Bonn, 2008
- [Fra05] FRANK, R.: Reinigung von Grauwasser - ein biologisches Konzept zur Brauchwassernutzung, Veitshöchheimer Berichte 81, Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Abteilung Landespflege, Würzburg/Veitshöchheim, 2005
- [FZ10] FENG, C., MENG, Q., ZHANG, Y.: Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings* 42, 959-965, 2010
- [GE11] GABRIEL, K.M.A., ENDLICHER, W.R.: Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution* 159, 2044-2050, 2011
- [GB06] GAFFIN, S., PARSHALL, L., O'KEEFFE, G., BRAMAN, D., BEATTIE, D., BERGHAGE, R.: Energy balance modeling applied to a comparison of White and Green roof cooling efficiency (7-14). In: Rosenzweig, C., S. Gaffin und L. Parshall (Hrsg.): *Green roofs in the New York metropolitan region: Research Report*. Columbia University Center for Climate Systems Research and NASA Goddard Institute for Space Studies, 2006
- [Gra00] GRANTZAU, E.: Gießwasser - ein wichtiger Produktionsfaktor (1). *Deutscher Gartenbau*, H. 10/2000, S. 53/54, 2000
- [GW05] GERMERSHAUSEN, R., MAXL, S., SCHELLER, E., WEISS, L.: Betriebswasser, in: *Urbaner Metabolismus - Die Städtische Infrastruktur von Berlin* (Hrsg. Prytula, M.). Technische Universität Berlin, 2005
- [Har08] HARLASS, R.: *Verdunstung in bebauten Gebieten*. Dissertation an der technischen Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, 2008
- [Häm05] HÄMMERLE, F.: *Der Gründachmarkt in Deutschland, Marktspiegel, Analyse, Entwicklung*. Welt Gründach-Kongress, 15.-16. Sept. 2005, Basel, Schweiz, 2005
- [HJ10] HE, H., JIM, C.Y.: Simulation of thermodynamic transmission in green roof ecosystem. *Ecological Modelling* 221, 2949-2958, 2010
- [KS09] KOLB, W., SCHWARZ, T.: *Zum Klimatisierungseffekt von Pflanzenbeständen auf Dächern*. Veitshöchheimer Berichte 131, Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Abteilung Landespflege, Würzburg/Veitshöchheim, 2009
- [KT02] KÖHLER, M., SCHMIDT, M., GRIMME, F.-W., LAAR, M., DE ASSUNCAO PAIVA, V.L., TAVARES, S.: Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics - far beyond the aesthetics, *Environmental Management and Health*, vol. 13, 2002
- [Liu05] LIU, K.K.Y.: *Towards sustainable roofing*, Institute for research in construction (Canada), 2005
- [Mei16] MEINKEN, E.: Persönliche Mitteilung, 2016
- [ML11a] MACIVOR, J.S., RANALLI, M., LUNDHOLM, J.T.: Performance of dryland and wetland species on extensive green roofs. *Annals of Botany* 107, 671-679, 2011
- [NA10] NIU, H., CLARK, C., ZHOU, J., ADRIAENS, P.: Scaling of environmental benefits from green roof implementation in Washington, DC. *Environmental Science and Technology* 44, 4302-4308, 2010
- [Nol05] NOLDE, E.: Greywater recycling systems in Germany - results, experiences and guidelines. *Water Science and Technology*, 51(10), 203-210, 2005

- [OR07] OBERNDORFER, E., LUNDHOLM, J., BASS, B., COFFMAN, R.D., DOSHI, H., DUNNETT, N., GAFFIN, S., KÖHLER, M., LIU, K.K.Y., ROWE, B.: Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience* 57(10), 823-833, 2007
- [PG10] PINTO, U., MAHESHWARI, B.L., GREWAL, H.S.: Effects of greywater irrigation on plant growth, water use and soil properties. *resources conservation and recycling*, vol. 54, issue 7, 2010
- [Rez05] REZAEIE, F.: Evapotranspiration rates from extensive green roof plant species, master thesis, Pennsylvania State University, USA, 2005
- [RK06] ROESNER, L., QIAN, Y., CRISWELL, M., STROMBERGER, M., KLEIN, S.: Longterm Effects of Landscape Irrigation Using Household Greywater - Literature Review and Synthesis, Water Environment Research Foundation (WERF), Colorado State University, USA, 2006
- [San14] SANTAMOURIS, M.: 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, 2014
- [Sch09a] SCHMIDT, M.: *The interaction between water and energy of greened roofs*. World Green Roof Congress, 15.-16 September, Basel, Schweiz, 2009
- [Sch09b] SCHMIDT, M.: *Rainwater harvesting for mitigating local and global warming*. Fifth Urban Research symposium, 28.-30. Juni 2009, Marseille, Frankreich, 2009
- [Tho09] THON, A.: Shallow Constructed Roof Wetlands for Greywater Treatment: Intermittently Flushed wetlands as Roof Gardens in Mediterranean Countries, master thesis, Anhalt University of Applied Sciences, Bernburg, Deutschland, 2009
- [Tvo11] TRINKWASSERVERORDNUNG, Auszug aus dem Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 61, S. 2371 ff., 2011
- [Wag10] WAGNER, G.: *Waschmittel - Chemie, Umwelt, Nachhaltigkeit*. Wiley-VCH-Verlag, Weinheim, 2010
- [WL08] WOLF, D., LUNDHOLM, J.T.: Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability. *Ecological Engineering* 33, 179-186, 2008

## 7 Anhang

### 7.1 Berechnungen zur Dosierung der Waschmittelmenge für die Versuchsgrauwässer

Moderne Waschmaschinen verbrauchen laut Herstellerangaben für einen Waschgang 37 bis 54 (im Extrem 69) Liter, im Durchschnitt 50 Liter Wasser (Tab. 7.1). Die Waschmitteldosierungsempfehlung sechs verschiedener Waschmittelhersteller (bei normal verschmutzter Wäsche und Verwendung des harten Freisinger Leitungswassers (17 °KH)) liegt bei durchschnittlich 85,8 g/Waschgang (Tab. 7.2).

**Tab. 7.1: Wasserverbrauch von Waschmaschinen für einen vollen Waschgang laut Herstellerangaben**

Wasserverbrauch	Waschmaschine
< 40 Liter	Siemens WM 14Q44A iQ500 (37 l)
40-50 Liter	AEG Electrolux Lavamat L 60660 FL (45 l); Candy Slimmy Go 4126 (45 l); Bosch WAY 32890 (48 l); Siemens WM 164540 iQ800 (48 l); Gorenje WA 73141 (49 l)
> 50 Liter	Bauknecht WA PL 9741 BW (54 l); Bosch WAQ 284G1 (53 l); Miele W 3241 WPS (53 l); Siemens WM 14 Q 410 (69 l);
<b>Mittelwert:</b>	<b>50 Liter</b>

**Tab. 7.2: Waschmittel-Dosierungsempfehlungen der Hersteller**

Waschmittel	Vol.-Gew. (g/l)	ml/Waschgang	g/Waschgang
Ariel Compact Color and Style	852	110	93,7
Weißer Riese Megapearls	844	105	88,6
Tandil Ultra Plus Color	794	110	87,3
Tandil fein	588	125	73,5
Tandil Ultra Plus	794	110	87,3
Denk mit Vollwaschmittel	844	100	84,4
<b>Mittelwert</b>	<b>786</b>	<b>110</b>	<b>85,8</b>

Der Anteil der Waschmaschinenabwässer am insgesamt nutzbaren Grauwasser (aus Badewanne, Dusche, Handwaschbecken und Waschmaschine, jedoch ohne Toiletten- und Küchenabwasser) beträgt nach einer Sichtung diverser homepages durchschnittlich 27 % (Tab. 7.3). Daraus errechnet sich folgendes: 50 Liter Wasser (pro Waschgang) sind 27 % des Grauwassers, d.h. 100 % wären 185 Liter. Darin sind 86 g Waschmittel enthalten. Dies ergibt einen Waschmittelbedarf von rund 0,5 g Waschmittel/l Grauwasser.



**Tab. 7.3: Angaben zum Anteil der Waschmaschinen-Abwässer am gesamten nutzbaren Haushalts-Grauwasser\***

Quelle	Anteil Abwasser (%)
www.dieregensammler.de	22
www.was-wir-essen.de (aid)	25
www.hydrologie.uni-oldenburg.de	25
www.Umweltbundesamt.de	25
www.sparhaushalt.com	30
www.tag-des-wassers.com	36
<b>Mittelwert</b>	<b>27</b>

\* Abwasser aus Bad (ohne Toilette) und Waschmaschine

## 7.2 Angaben zu den Pflanzenversuchen

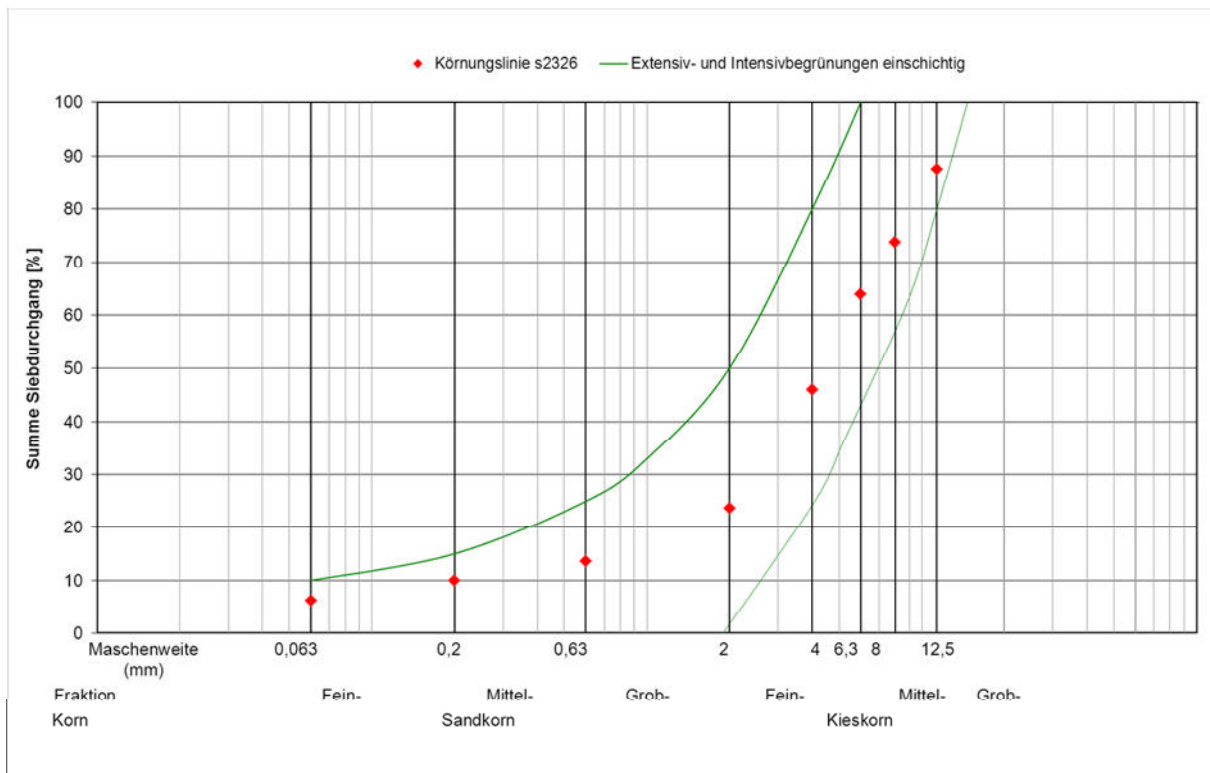
### 7.2.1 Erster Pflanzenversuch

**Tab. 7.4: Versuchsplan „Verträglichkeit verschiedener Kräuter und Gräser gegenüber Grauwasser und deren Transpirationsleistung“**

1. Versuchsfaktor: Pflanzenart	1-43: 43 Gräser und Stauden (= "Kräuter", siehe Tab. 3.1)
2. Versuchsfaktor: Bewässerung	1: 100 % Grauwasser 2: 100 % Grauwasser + Auswaschung (Auswaschung mit vollentsalztem Wasser (Simulation eines Regenschauers), 1 Liter/Topf (= 0,4 Liter Wasser/Liter Substrat) am 01.08. und 27.09.2012) 3: 100 % Leitungswasser (Kontrolle)
Substrat	Dachbegrünungssubstrat, extensiv, Systemerde "Sedumteppich" (Bestandteile: Tonschiefer, Ziegelsplitt, Lava, Grüngutkompost, Hochmoortorf H2-H4 bzw. H6-H8)
Versuchsgefäße	2,5-l-Container
Klimaeinstellungen	Heiztemperatur T/N = 18/16 °C, Lüftungstemperatur 22 °C, keine Schattierung;
Pflege der Pflanzen	Bewässerung, Düngung und Pflanzenschutz nach Bedarf
Versuchsdauer	KW 25/2012 bis 22/2013, Dauer: 49 Wochen
Untersuchungen/ Auswertungen	- Analyse des Grauwassers - Ermittlung des Wasserverbrauchs - Substratanalysen zu Versuchsbeginn, in KW 42/12 und zu VS-Ende - Bonitur der Pflanzenentwicklung - Messung der Transpirationsleistung ausgewählter Pflanzenarten in Tageslichtkammern für 23 Tage - am Versuchsende Ermittlung des Frischgewichts der Pflanzen
Versuchsumfang	zweifaktorielle Blockanlage (43 Pflanzenarten * 3 Bewässerungsarten) mit 8 Wiederholungen (= 8 Einzelpflanzen) somit 1.032 Pflanzen im Versuch

**Tab. 7.5: Analysenergebnisse des für den ersten Pflanzenversuch verwendeten Substrats und die Anforderungen an Vegetationssubstrate für Extensivbegrünungen nach FLL**

Parameter	Systemerde "Sedumteppich" (verwendetes Substrat)	Anforderungen an Vegetationssubstrate für Extensivbegrünungen nach FLL [FLL08]	
		Einschicht- bauweisen	Mehrschicht- bauweisen
Anteil Körnung $d \leq 0,063$ mm	7,1 Massen-%	$\leq 10$ Massen-%	$\leq 15$ Massen-%
Anteil Körnung $d > 4$ mm	35,2 Massen-%	$\leq 75$ Massen-%	$\leq 50$ Massen-%
Rohdichte trocken	1,00 g/cm <sup>3</sup>	keine Anforderungen	
Rohdichte bei $W_{K_{max}}$	1,44 g/cm <sup>3</sup>	keine Anforderungen	
Gesamtporenvolumen	62,8 Vol.-%	keine Anforderungen	
Max. Wasserkapazität ( $W_{K_{max}}$ )	45,2 Vol.-%	20 - 65 Vol.-%	35 - 65 Vol.-%
Luftkapazität bei ( $W_{K_{max}}$ )	17,6 Vol.-%	$\geq 10$ Vol.-%	
Wasserdurchlässigkeit bei $W_{K_{max}}$	65 mm/min	60 - 400 mm/min	0,6 - 70 mm/min
Salzgehalt (H <sub>2</sub> O)	1,13 g/l	$\leq 3,5$ g/l	$\leq 3,5$ g/l
Stickstoff (N) (CAT)	36 mg/l	$\leq 80$ mg/l	
Phosphat (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (CAT)	35 mg/l	$\leq 50$ mg/l	
Kali (K <sub>2</sub> O) (CAT)	236 mg/l	$\leq 500$ mg/l	
Magnesium (Mg) (CAT)	195 mg/l	$\leq 200$ mg/l	
pH (CaCl <sub>2</sub> )	9,8	6,0 - 8,5	
Organische Substanz	8 g/l	$\leq 40$ g/l	$\leq 65$ g/l
CaCO <sub>3</sub>	1,3 Massen-%	keine Anforderungen	



**Abb. 7.1: Körnungslinie des im ersten Pflanzenversuch verwendeten Substrates**

## 7.2.2 Zweiter Pflanzenversuch

### 7.2.2.1 Gewächshaus/Tageslichtkammer

**Tab. 7.6: Aufbau der Pflanzmodule im "Vegetationsversuch mit Kräuter/Gräser-Mischungen im Vergleich zu herkömmlichen *Sedum*-Bepflanzungen unter Verwendung von Grauwasser - Gewächshaus/Tageslichtkammer"**

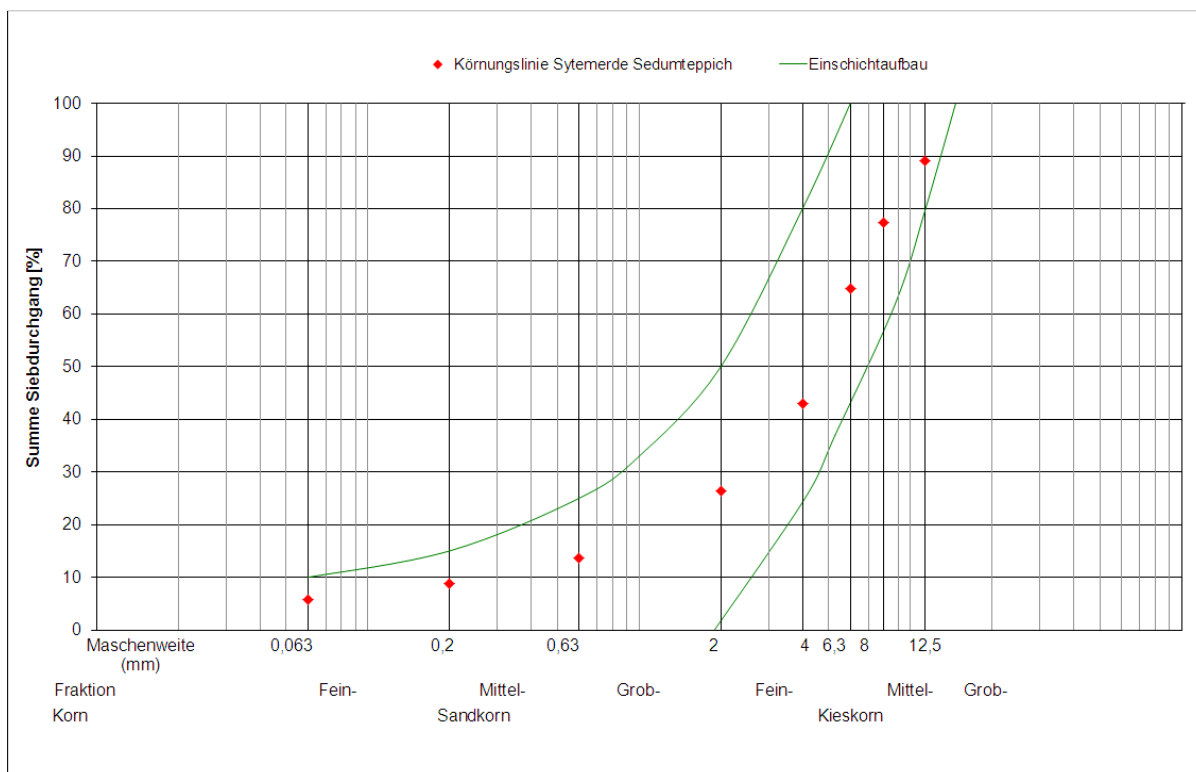
Modul	Enthaltene Pflanzen/Parzelle (= 0,43 Netto-m <sup>2</sup> )
80K/20G	80 % Kräuter + 20 % Gräser 1 <i>Euphorbia seguieriana</i> , 1 <i>Euphorbia palustre</i> , 1 <i>Sanguisorba officinalis</i> , 1 <i>Bergenia cordifolia</i> , 1 <i>Achillea millefolium</i> , 1 <i>Inula ensifolia</i> , 1 <i>Hemerocallis minor</i> , 1 <i>Geranium x pratense</i> , 1 <i>Briza media</i> , 1 <i>Carex buechananii</i>
80K/20G	50 % Kräuter + 50 % Gräser 1 <i>Euphorbia seguieriana</i> , 1 <i>Euphorbia palustre</i> , 1 <i>Sanguisorba officinalis</i> , 1 <i>Bergenia cordifolia</i> , 1 <i>Achillea millefolium</i> , 2 <i>Briza media</i> , 2 <i>Carex buechananii</i> , 1 <i>Carex flacca</i>
80K/20G	20 % Kräuter + 80 % Gräser 1 <i>Euphorbia seguieriana</i> , 1 <i>Euphorbia palustre</i> , 3 <i>Briza media</i> , 3 <i>Carex buechananii</i> , 2 <i>Carex flacca</i>
S.-Mix	<i>Sedum</i> -Mix 2 <i>Sedum acre</i> , 2 <i>Sedum album</i> , 1 <i>Sedum floriferum</i> 'Weihenstephaner Gold', 2 <i>Sedum reflexum</i> , 2 <i>Sedum sexangulare</i> , 1 <i>Sedum spurium</i>
S.'WG'	<i>Sedum</i> 'Weihenstephaner Gold' 10 <i>Sedum floriferum</i> 'Weihenstephaner Gold'
OV	ohne Bepflanzung (nur Substrat)
GW bzw. LW	ohne Bepflanzung (nur Grau- bzw. Leitungswasser), nur im Gewächshaus

**Tab. 7.7: Angaben zum Versuch "Vegetationsversuch mit Kräuter/Gräser-Mischungen im Vergleich zu herkömmlichen *Sedum*-Bepflanzungen unter Verwendung von Grauwasser - Gewächshaus"**

1. Versuchsfaktor Pflanzmodul/ Bepflanzung	1: 80 % Kräuter und 20 % Gräser (80K/20G) 2: 50 % Kräuter und 50 % Gräser (50K/50G) 3: 20 % Kräuter und 80 % Gräser (20K/80G) 4: 100 % <i>Sedum</i> -Mix (S.-Mix) 5: 100 % <i>Sedum floriferum</i> 'Weihenstephaner Gold' (S.'WG') 6: ohne Bepflanzung (nur Substrat) (OV) 7: ohne Bepflanzung (nur Wasser) (GW oder LW)
2. Versuchsfaktor: Gießwasser	1: Grauwasser (GW) 2: Leitungswasser (LW)
Substrat	Extensives Dachbegrünungssubstrat „Sedumteppich“, Substrathöhe ca. 10 cm (40 Liter Substrat pro Parzelle + ca. 4 Liter Pflanzenballen)
Versuchsgefäße/ Standort	Kunststoffschalen mit einer Größe von 0,6 x 0,8 m und somit einer Grundfläche von 0,43 m <sup>2</sup> aufgestellt im teilklimatisierten Gewächshaus
Pflege der Pflanzen	Rückschnitt in KW 9/14 (außer <i>Bergenia</i> und <i>Euphorbia</i> )
Düngung	mit Fertyl 1 Rot (20+7+10+(2)) in KW 36/13 und KW 10/14, 0,1 %ig auf der Basis 1 g N/Schale = 25 mg N/l Substrat; mit Osmocote Exact 3-4 M (16+9+12(+2)) in KW 23/14: 8 g/m <sup>2</sup> für die Var. 1-3 bzw. 8-10 und 5 g/m <sup>2</sup> für die Var. 4 und 5 bzw. 11 und 12
Pflanzenschutz	gegen Spinnmilben in KW 35/13 sowie gegen weiße Fliege, Thripse und Spinnmilben in KW 24/14 ff.
Heizung/Belichtung	<u>Heizung</u> : ab KW 33/13: Tag/Nacht (=T/N) 25/5 °C, ab KW 37/13: T/N 20/15 °C, ab KW 44/13: T/N 5/5 °C (Winterruhe); ab KW 9/14: T/N 15/10 °C, Lüftung: 18 °C; <u>Belichtung</u> : Assimilationslampen zwischen 7 und 16 Uhr, wenn Außenlicht <10 klx: KW 37/13 - 43/13 und wieder ab KW 9/14
Versuchszeitraum	KW 27/13 - 40/14 (Dauer: 66 Wochen)
Untersuchungen/ Auswertungen	Analyse des verwendeten Grauwassers Erfassung der Gießwassermengen Substratanalysen zu VS-Beginn und -Ende Regelmäßige Bonituren der Pflanzenentwicklung Ermittlung Frisch- und Trockengewicht der Pflanzen Analyse der Pflanzentrockensubstanz Messungen in Tageslichtkammern für 6 Wochen
Versuchsumfang	zweifaktorielle Blockanlage (7 Bepflanzungsarten * 2 Gießwässer) dreifach wiederholt, somit 42 Parzellen im Versuch

**Tab. 7.8: Analysenergebnisse des für den zweiten Pflanzenversuch verwendeten Substrats und die Anforderungen an Vegetationssubstrate für Extensivbegrünungen nach FLL**

Parameter	Systemerde "Sedumteppich" (verwendetes Substrat)	Anforderungen an Vegetationssubstrate nach FLL [FLL08]	
		Einschicht- Bauweisen	Mehrschicht- Bauweisen
Anteil Körnung d ≤ 0,063 mm	6,1 Massen-%	≤ 10 Massen-%	≤ 15 Massen-%
Anteil Körnung d > 4 mm	54,1 Massen-%	≤ 75 Massen-%	≤ 50 Massen-%
Rohdichte trocken	1,00 g/cm <sup>3</sup>	keine Anforderungen	
Rohdichte bei WK <sub>max</sub>	1,41 g/cm <sup>3</sup>	keine Anforderungen	
Gesamtporenvolumen	62,5 Vol.-%	keine Anforderungen	
Max. Wasserkapazität (WK <sub>max</sub> )	41,8 Vol.-%	20 - 65 Vol.-%	35 - 65 Vol.-%
Luftkapazität bei (WK <sub>max</sub> )	20,8 Vol.-%	≥10 Vol.-%	
Wasserdurchlässigkeit bei WK <sub>max</sub>	64 mm/min	60 - 400 mm/min	0,6 - 70 mm/min
Salzgehalt (H <sub>2</sub> O)	2,50 g/l	≤3,5 g/l	≤3,5 g/l
Stickstoff (N) (CAT)	26 mg/l	≤80 mg/l	
Phosphat (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (CAT)	37 mg/l	≤50 mg/l	
Kali (K <sub>2</sub> O) (CAT)	201 mg/l	≤500 mg/l	
Magnesium (Mg) (CAT)	170 mg/l	≤200 mg/l	
pH (CaCl <sub>2</sub> )	7,7	6,0 - 8,5	
Organische Substanz	17 g/l	≤ 40 g/l	≤ 65 g/l



**Abb. 7.2: Körnungslinie des im zweiten Pflanzenversuch verwendeten Substrates**

**Tab. 7.9: Sollwerte der Parameter in der Tageslichtkammer - zweiter Pflanzenversuch von KW 38/13 bis KW 43/13**

Parameter	Einstellungen
Temperatur [° C]	27
rel. LF [%]	60
Belichtung	Natrium-Hochdruckdampflampen: an bei < 15 klx Außenlicht, aus bei > 20 klx Außenlicht
Bewässerung	Die drei Kräuter/Gräser-Mischungen sowie die zwei <i>Sedum</i> -Varianten wurden dreimal wöchentlich auf das Sollgewicht von 57,5 kg aufgegossen, außerdem wurden die beiden <i>Sedum</i> -Module und ein Variante OV nicht bewässert

**Tab. 7.10: Nährstoffgehalte der Pflanzen-Trockensubstanzen der Grauwasser-Varianten 1-5 am Versuchsende**

Variante/ Pflanzenart	N % TS	P % TS	K % TS	Ca % TS	Mg % TS	S % TS	Fe mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Mo mg/kg
1/ <i>Achillea</i>	1,21*	0,34	4,22	1,93	0,67	1,04	354	10,0	40	6,6
1/ <i>Bergenia</i>	0,59	0,16	1,93	1,70	0,40	0,49	459	4,4	15	2,9
1/ <i>Euphorb. pal.</i>	0,98	0,58	1,10	1,75	0,34	0,27	54	8,5	167	4,4
1/ <i>Euphorb. seg.</i>	0,96	0,32	1,33	1,15	0,30	0,21	77	4,5	8	1,3
1/ <i>Geranium</i>	0,81	0,39	1,39	3,10	0,83	0,89	174	7,5	25	5,2
1/ <i>Hemerocallis</i>	0,83	0,41	1,15	1,92	0,45	1,09	137	3,3	40	6,2
1/ <i>Inula</i>	0,95	0,15	1,25	1,56	0,39	0,99	218	10,9	33	9,1
1/ <i>Sanguisorba</i>	0,85	0,37	1,93	2,17	0,37	0,37	127	4,3	14	2,8
1/ <i>Briza</i>	0,82	0,14	1,53	0,95	0,39	1,06	173	5,9	72	8,4
1/ <i>Carex buch.</i>	0,57	0,11	1,44	0,45	0,23	0,39	28	5,0	34	2,7
2/ <i>Achillea</i>	1,43	0,40	3,76	1,65	0,64	0,71	(71)	8,3	26	4,0
2/ <i>Bergenia</i>	0,61	0,20	1,83	1,62	0,41	0,30	83	3,3	7	2,7
2/ <i>Euphorb. pal.</i>	1,15	0,60	1,01	1,79	0,37	0,29	99	9,0	134	4,3
2/ <i>Euphorb. seg.</i>	1,00	0,34	1,26	1,39	0,33	0,24	24	5,2	7	1,5
2/ <i>Sanguisorba</i>	1,00	0,31	2,38	2,07	0,26	0,29	47	4,8	10	2,4
2/ <i>Briza</i>	0,87	0,16	1,47	0,99	0,41	0,92	478	6,6	70	6,6
2/ <i>Carex buch.</i>	0,59	0,09	1,39	0,34	0,20	0,32	25	4,3	26	2,6
2/ <i>Carex flacca</i>	0,76	0,11	1,83	1,01	0,42	0,91	288	4,4	23	6,2
3/ <i>Euphorb. pal.</i>	1,37	0,74	1,26	1,85	0,33	0,35	51	13,5	115	4,3
3/ <i>Euphorb. seg.</i>	1,23	0,33	1,41	1,27	0,32	0,26	57	5,5	6	1,6
3/ <i>Briza</i>	1,08	0,16	1,88	0,80	0,36	0,79	80	5,6	61	7,0
3/ <i>Carex buch.</i>	0,56	0,09	1,41	0,42	0,23	0,40	29	4,6	23	3,1
3/ <i>Carex flacca</i>	0,65	0,10	1,72	0,91	0,40	0,87	138	3,6	20	6,9
4/ <i>Sedum flor. /Mix</i>	0,97	0,44	1,87	3,77	0,49	0,70	1079	10,4	30	4,4
4/ <i>Sedum spurium</i>	0,86	0,40	1,93	2,23	0,45	0,40	135	9,4	11	3,2
5/ <i>Sedum flor. 'WG'</i>	1,11	0,39	1,64	4,05	0,61	0,56	308	8,6	16	2,3

\* blau/rot = besonders hohe/niedrige Werte

Tab. 7.11: Nährstoffgehalte der Pflanzen-Trockensubstanzen der Leitungswasser-Varianten 8-12 am Versuchsende

Variante/ Pflanzenart	N % TS	P % TS	K % TS	Ca % TS	Mg % TS	S % TS	Fe mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Mo mg/kg
8/ <i>Achillea</i>	0,99*	0,21	3,23	1,75	0,59	0,30	59	6,1	23	2,2
8/ <i>Bergenia</i>	0,47	0,17	1,43	2,03	0,45	0,25	322	2,5	13	1,8
8/ <i>Euphorb. pal.</i>	0,69	0,35	0,95	1,58	0,34	0,16	45	5,3	148	2,9
8/ <i>Euphorb. seg.</i>	0,79	0,28	0,95	1,35	0,35	0,20	54	3,7	8	1,6
8/ <i>Geranium</i>	0,88	0,23	0,95	3,26	0,81	0,57	239	5,4	43	7,0
8/ <i>Hemerocallis</i>	0,59	0,23	0,61	2,76	0,55	0,59	726	2,6	46	4,6
8/ <i>Inula</i>	0,75	0,15	1,50	2,79	0,59	0,62	32	8,9	36	7,8
8/ <i>Sanguisorba</i>	0,71	0,22	1,45	2,91	0,39	0,24	44	3,2	16	2,9
8/ <i>Briza</i>	0,62	0,11	1,44	0,76	0,34	0,26	46	2,7	69	4,1
8/ <i>Carex buch.</i>	0,60	0,13	1,37	0,52	0,26	0,23	23	3,8	32	2,4
9/ <i>Achillea</i>	1,11	0,29	2,96	1,86	0,71	0,49	407	5,8	36	3,8
9/ <i>Bergenia</i>	0,56	0,18	1,43	2,12	0,44	0,24	123	2,5	10	2,5
9/ <i>Euphorb. pal.</i>	0,80	0,34	0,87	1,77	0,40	0,20	38	5,3	164	3,3
9/ <i>Euphorb. seg.</i>	0,78	0,27	0,88	1,27	0,34	0,19	86	4,4	11	1,5
9/ <i>Sanguisorba</i>	0,79	0,22	1,74	2,86	0,29	0,25	66	4,0	n.b.	3,0
9/ <i>Briza</i>	0,67	0,12	1,50	0,88	0,36	0,33	174	3,7	78	4,1
9/ <i>Carex buch.</i>	0,49	0,13	1,29	0,52	0,24	0,24	92	4,1	31	2,3
9/ <i>Carex flacca</i>	0,65	0,09	1,59	0,96	0,37	0,46	392	3,6	24	3,7
10/ <i>Euphorb. pal.</i>	1,10	0,66	1,22	2,11	0,42	0,25	37	8,2	164	5,1
10/ <i>Euphorb. seg.</i>	1,05	0,32	1,18	1,53	0,35	0,22	98	4,9	10	1,8
10/ <i>Briza</i>	0,78	0,16	1,82	0,76	0,37	0,28	165	3,8	69	4,6
10/ <i>Carex buch.</i>	0,52	0,12	1,36	0,47	0,24	0,22	25	3,4	23	2,3
10/ <i>Carex flacca</i>	0,72	0,11	1,64	1,01	0,39	0,45	509	2,7	22	3,4
11/ <i>Sedum flor. /Mix</i>	0,83	0,41	1,65	4,19	0,52	0,56	1696	9,6	44	4,0
11/ <i>Sedum spurium</i>	0,77	0,42	1,80	3,55	0,54	0,44	118	9,9	17	3,7
12/ <i>Sedum flor. 'WG'</i>	0,98	0,36	1,34	4,62	0,63	0,51	635	8,5	35	2,3

\* blau/rot = besonders hohe/niedrige Werte

### 7.2.2.2 Freiland

**Tab. 7.12: Angaben zum Versuch "Vegetationsversuch mit Kräuter/Gräser-Mischungen im Vergleich zu herkömmlichen *Sedum*-Bepflanzungen unter Verwendung von Grauwasser-Freiland"**

1. Versuchsfaktor: Pflanzenmodul	1: 80 % Kräuter und 20 % Gräser (80K/20G) 2: 50 % Kräuter und 50 % Gräser (50K/50G) 3: 20 % Kräuter und 80 % Gräser (20K/80G) 4: 100 % <i>Sedum</i> -Mix (S.-Mix) 5: 100 % <i>Sedum floriferum</i> 'Weihenstephaner Gold' (S.'WG')	
2. Versuchsfaktor: Systemaufbau	Unterbau (bei beiden Systemen, v. u. n. o.): Polyestervlies grau FPO-Folie (wurzelfeste Abdichtung), 1 mm stark Schutzvlies weiß, dann <b><u>1: Aufbau 1 (FD25-Elemente) (v. u. n. o.):</u></b> Floradrain FD 25 (Drain- & Speicherelement, 25 mm hoch, ca. 3 Liter Wasserspeichervermögen/m <sup>2</sup> ) dünnes Filtervlies Tropfschläuche (von oben und unten mit Substrat bedeckt) Vegetationstragschicht ca. 10 cm <b><u>2: Aufbau 2 (AT45-Elemente) (v. u. n. o.):</u></b> Aquatec AT 45 (Drain- & Speicherelement, 45 mm hoch, ca. 17 Liter Wasserspeichervermögen/m <sup>2</sup> ) Tropfschläuche Dochtvlies (Filter- & Wasserverteilstvlies) Vegetationstragschicht ca. 10 cm	
3. Versuchsfaktor: Gießwasser	1: Grauwasser 2: Leitungswasser	
Substrat	Dachbegrünungssubstrat, extensiv ("Sedumteppich", Analysen s. Tab. 7.8 und Abb. 7.2.)	
Standort	aufgeständerte, parzellierte Betontische im Freiland mit Auffangmöglichkeit für Dränwasser	
Pflege der Pflanzen	Bewässerung mit Tropfschläuchen	
Düngung	Düngung 1 am 2.6.14 mit Osmocote Exakt 3-4 M (16+9+12(+2)); Düngung 2 am 3.7.15 mit Nutricote 15-5-10	Kräuter/Gräser-Parzellen: jeweils auf der Basis 5 g N/m <sup>2</sup> <i>Sedum</i> -Parzellen: Düngung 1 auf der Basis 4 g N/m <sup>2</sup> , Düngung 2 auf der Basis 5 g N/m <sup>2</sup>
Versuchsdauer	KW 28/13 - 40/14, Dauer: 66 Wochen (Versuch wurde darüber hinaus stehen gelassen)	
Untersuchungen/ Auswertungen	Analyse des Grauwassers Erfassung Gießwassermengen Erfassung Dränwassermengen und Analyse des Dränwassers Substratanalysen zu Beginn nach FLL Regelmäßige Bonitur der Pflanzenentwicklung Aufwand für Pflegemaßnahmen (Rückschnitt, Fremdbewuchs)	
Versuchsumfang	dreifaktorielle Blockanlage (5 Pflanzmodule * 2 Systemaufbauten * 2 Gießwässer) dreifach wiederholt, somit 60 Parzellen im Versuch mit je 1 m <sup>2</sup>	



**Tab. 7.13: Aufbau der Pflanzmodule - Freiland**

Modul	Enthaltene Pflanzen/Parzelle (= 1 m <sup>2</sup> )
80K/20G	<u>80 % Kräuter + 20 % Gräser</u> 2 <i>Euphorbia seguieriana</i> , 2 <i>Euphorbia palustre</i> , 2 <i>Sanguisorba officinalis</i> , 2 <i>Bergenia cordifolia</i> , 2 <i>Achillea millefolium</i> , 1 <i>Inula ensifolia</i> , 1 <i>Hemerocallis minor</i> , 1 <i>Geranium x pratense</i> , 1 <i>Briza media</i> , 1 <i>Carex buchananii</i> , 1 <i>Carex flacca</i>
50K/50G	<u>50 % Kräuter + 50 % Gräser</u> 1 <i>Euphorbia seguieriana</i> , 1 <i>Euphorbia palustre</i> , 1 <i>Sanguisorba officinalis</i> , 1 <i>Bergenia cordifolia</i> , 1 <i>Achillea millefolium</i> , 1 <i>Inula ensifolia</i> , 1 <i>Hemerocallis minor</i> , 1 <i>Geranium x pratense</i> , 3 <i>Briza media</i> , 3 <i>Carex buchananii</i> , 2 <i>Carex flacca</i>
20K/80G	<u>20 % Kräuter + 80 % Gräser</u> 1 <i>Euphorbia seguieriana</i> , 1 <i>Euphorbia palustre</i> , 1 <i>Achillea millefolium</i> , 5 <i>Briza media</i> , 4 <i>Carex buchananii</i> , 4 <i>Carex flacca</i>
S.-Mix	<u>Sedum- Mix</u> 3 <i>Sedum acre</i> , 3 <i>Sedum album</i> , 2 <i>Sedum floriferum</i> `Weihenstephaner Gold`, 3 <i>Sedum reflexum</i> , 3 <i>Sedum sexangulare</i> , 2 <i>Sedum spurium</i>
S. 'WG'	<u><i>Sedum floriferum</i> `Weihenstephaner Gold`</u> 16 <i>Sedum floriferum</i> `Weihenstephaner Gold`

**Tab. 7.14: Qualität des Drainwassers hinsichtlich pflanzenphysiologischer oder umweltrelevanter Parameter bei Einsatz unterschiedlicher Gießwässer und Systemaufbauten (Drainwasserentnahmen v. 1.7.14 und 15.7.14\*)**

Parameter	1.7.14**		15.7.14				Trinkwasser-VO <sup>1)</sup>
	GW	LW	GW, Var.		LW, Var.		
	Var. 1-5 (FD 25)	Var. 11-15 (FD 25)	1-5 (FD 25)	6-10 (AT 45)	11-15 (FD 25)	16-20 (AT 45)	
pH-Wert	7,5/7,8 <sup>2)</sup>	7,9/8,0	8,0/8,1	8,3/8,3	8,3/8,4	8,4/8,5	6,5-9,0
LF (25 °C, µS/cm)	878/934	643/681	852/911	904/997	557/589	704/771	2790
Salz (g/l)	0,46/0,49	0,34/0,36	0,45/0,4	0,48/0,5	0,2+9/0,3	0,37/0,41	-
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	0,7/0,9	0,5/0,5	0,3/0,9	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0,39
NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	2,0/3,5	2,8/3,9	0,1/0,3	0/0,1	0,2/0,5	0,2/0,5	11,5
P <sub>205</sub> (mg/l)	4,0/5,3	2,7/2,9	2,5/3	1,9/2,4	2,1/2,3	1,6/1,7	-
K <sub>20</sub> (mg/l)	24/32	17/21	20/22	22/27	16/19	18/19	-
Mg (mg/l)	21/23	21/22	21/23	24/26	17/19	24/27	-
Ca (mg/l)	91/100	86/94	96/104	91/100	75/81	93/104	-
Na (mg/l)	61/64	13/14	57/61	76/84	12/13	18/19	200
S (mg/l)	80/87	49/53	85/95	87/103	47/53	62/71	-
Fe (µg/l)	78/88	56/61	37/42	22/27	30/35	17/21	200
Cu (µg/l)	21/52	7/9	7/10	8/10	6/7	7/9	2000
Mn (µg/l)	28/44	7/13	1/2	1/2	1/2	2/3	50
Zn (µg/l)	29/37	20/30	25/32	26/35	17/20	21/25	-
B (µg/l)	549/590	593/622	629/667	669/749	655/683	685/725	1000
Al (µg/l)	162/196	142/153	88/107	75/85	95/106	61/73	200
As (µg/l)	29/30	24/25	26/28	26/28	23/25	24/26	10
Cr (µg/l)	6/7	6/7	6/6	6/6	5/5	6/6	50
V (µg/l)	127/133	111/118	120/124	122/131	104/111	106/113	-
anion. Tenside (mg MBAS/l)	0,4/0,5	0,3/0,4	0,2/0,3	0,3/0,3	0,2/0,2	0,2/0,2	-
nichtio. Ten. (mg TritonX/l)	0,4/0,5	0,3/0,3	n.b. <sup>3)</sup>	n.b.	n.b.	n.b.	-

\* vierfaches Bewässern mit Grau-/Leitungswasser vom 10.6. bis 23.6.14

\*\* am 1.7. trat in den Parzellen mit dem Systemaufbau AT 45 kein Sickerwasser auf

<sup>1)</sup> [Tvo11]

<sup>2)</sup> nach dem Schrägstrich jeweils Maximalwerte

<sup>3)</sup> n.b. = nicht bestimmt

**Tab. 7.15: Vorgehensweise bei der Verdunstungsmessung im Freiland beim zweiten Pflanzenversuch**

1. Am Abend vor Versuchsbeginn wurden alle zehn Versuchspartzen (je zwei Wiederholungen (=Partzen)) der Leitungswasser-Varianten 11-15 mit Systemaufbau FD25) auf maximale Wasserspeicherung mit Leitungswasser gegossen (bis erstes Sickerwasser auftrat);
2. Am Morgen des ersten Messtags wurden die Sickerwasser-Kanister unter den Versuchspartzen aufgestellt und am Abend 10 Liter Leitungswasser verabreicht; am zweiten Messtag wurden morgens 5 und abends 5 Liter verabreicht; am Morgen des 3. Messtags wurde gewogen, wieviel Wasser in die Kanister durchgeflossen war; bei der Differenz zwischen dem verabreichten (20 Liter) und dem durchgeflossenen Wasser kann man davon ausgehen, dass es verdunstet wurde;
3. Nach Wiegung wurden am Morgen und am Abend des 3. Messtags jeweils 5 Liter gegossen und am nächsten Morgen wieder die durchgeflossenen Wassermenge gewogen;
4. Am 4. Messtag wurde genauso verfahren wie am 3. Messtag und am Morgen des nachfolgenden Tages ein letztes Mal gewogen, wieviel Wasser durchfloss.

## 7.3 Grundlagen der ökonomischen Betrachtung

### 7.3.1 Systemaufbau einer klassischen als Trockenstandort konzipierten extensiven Dachbegrünung

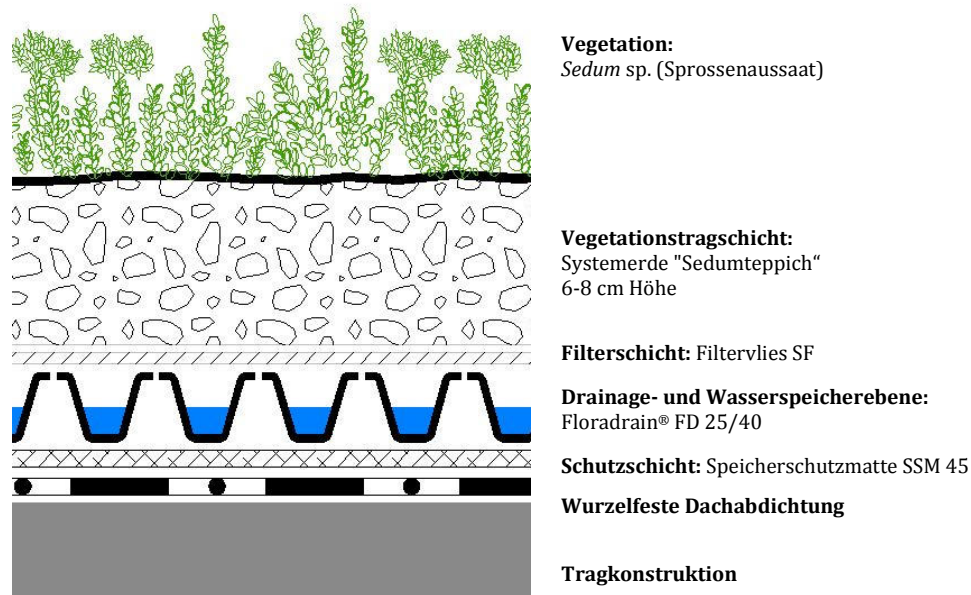


Abb. 7.3: Standardsystemaufbau extensive Dachbegrünung mit *Sedum*-Vegetation

Hierbei erfüllen die Schichten folgende Funktionen:

**Vegetation:** Möglichst sparsam im Wasserverbrauch, 3-4 Wochen Trockenheit überstehend. Im Schnitt gezeigt ist beispielhaft *Sedum album* als heimischer Vertreter der Sukkulenten. In der Regel werden bewusst reine *Sedum*-Vegetationen („Sedumteppich“) angesiedelt. In Deutschland bzw. Mitteleuropa kann die Etablierung i.d.R. ausgehend von *Sedum*-Sprossen geschehen. Trockenere Regionen erfordern eine Anpflanzung.

**Vegetationstragschicht:** Die Wasserhaltung ist bei maximiertem Luftgehalt so ausgelegt, dass die *Sedum*-Vegetation in Trockenperioden noch überlebt, höher wachsende unerwünschte Kräuter und Gräser jedoch vertrocknen. Bei der Höhe reichen in Deutschland meist 6 cm aus, im mediterranen Klimaraum werden 8 cm verbaut um den Verdunstungsverlusten entgegen zu wirken.

**Filterschicht:** Diese ist bei derart kompakten Aufbauten erforderlich, um die Filterstabilität herzustellen und somit eine Auswaschung von Feinteilen in die Drainage zu verhindern.

**Drainage und Wasserspeicherebene:** Überwiegend steht hier die Funktion der Drainage im Vordergrund. Überschüssiges Wasser soll rasch vom Dach abgeführt werden. Durch objektspezifisch ausgewählte Bauhöhen von z.B. 25 oder 40 mm wird erreicht, dass stehendes Wasser überbrückt und durch kapillaren Bruch entkoppelt von der Vegetationstragschicht wird. So kann die Vegetation – auch partiell – nicht zu üppig werden.

**Schutzschicht:** Um die Dachabdichtung zu schützen wird ein mechanisch belastbares geotextiles Vlies verwendet, welches dieser Anforderung gerecht wird.

**Wurzelfeste Dachabdichtung:** Nach FLL-Dachbegrünungsrichtlinie geprüfte Dachabdichtungsbahn, um Schäden am Bauwerk zu verhindern.

**Tragkonstruktion:** Diese muss entsprechend tragfähig ausgebildet sein. Da ein „Sedum-Teppich“-Aufbau bei 6 cm Vegetationstragschicht ca. 90 kg im Zustand maximaler Wasserspeicherung wiegt, entspricht dies ziemlich genau einem sonst häufig als Oberflächenschutz aufgebrauchten Kiesbelag. Insofern ist statisch gesehen meist keine Veränderung erforderlich.

Zur Erhöhung der Evapotranspirationsleistung einer klassischen Extensivbegrünung mit *Sedum*-Vegetation ist eine **Tröpfchenbewässerung** notwendig. Diese muss in sehr engen Abständen verlegt werden, da nur eine geringe Querverteilung im Substrat stattfindet. Gleichzeitig muss das Substrat ausreichend durchlässig sein, um einer Vegetationsumbildung in niederschlagsreichen Phasen durch eine Substratvernässung entgegen zu wirken. Neben den Tropfschläuchen werden noch Steuereinheiten sowie diverse Kleinmaterialien zur Installation benötigt.

### 7.3.2 Systemaufbau einer neuartigen verdunstungsmaximierten extensiven Dachbegrünung mit einer Gräser-Kräutervegetation

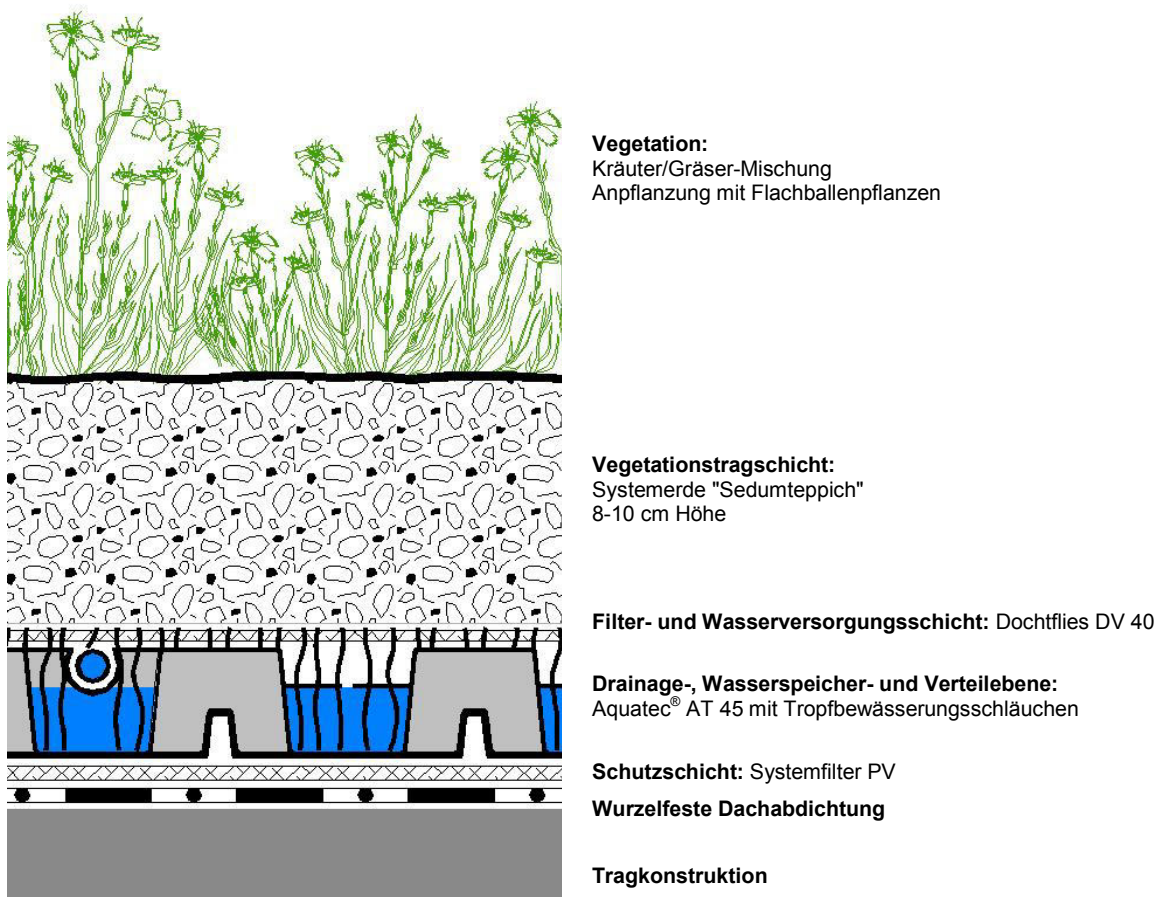


Abb. 7.4: Empfohlener neuer Systemaufbau „Verdunstungsmaximiertes extensives Gründach“ mit Kräuter/Gräser-Vegetation

**Vegetation:** Zur Auswahl, als eine der Kernfragestellungen der vorliegenden Forschung, wurde an anderer Stelle bereits eingehend ausgeführt. Wichtig erscheint es, die Pflanzen als Ballenpflanzen auszubringen um den gewünschten Bestand rasch und in der gewünschten Zusammenstellung zu erzielen. Im Vergleich zum „Sedum-Teppich“ ergibt sich hier somit ein Mehraufwand, da anstelle einer Sprossenaussaat mit Ballenpflanzen gearbeitet werden muss.

**Vegetationstragschicht:** Von den Eigenschaften her gesehen muss diese sich nicht vom Sedum-Teppich unterscheiden. Da bei einer integrierten automatisierten Bewässerung sehr häufig gegossen werden kann, besteht keine Erfordernis die Wasserspeicherkapazität zu erhöhen. Dies könnte sogar kontraproduktiv sein, da dann für die regenreichen Monate ein Überangebot an Wasser entsprechende Vegetationsumbildungen herbeiführt. Die Erhöhung der Vegetationstragschicht rührt zum Einen daher, dass Ballenpflanzen meist nur in dieser Ballenhöhe zu bekommen sind und zum anderen soll ausreichend Wurzelraum für die etwas stärker wachsenden Arten vorhanden sein.

**Filter- und Wasserversorgungsschicht:** Neben der Filterfunktion wird hier die Wasserversorgung durch kapillaren Wasseraufstieg integriert. Da eine oberflächige Ausbringung von Bewässerungswasser meist zu Problemen führt (Windabdrift, ungenau, Verbrennungsschäden, bei Grauwasser meist nicht erlaubt) erfolgt die Bewässerung vorzugsweise kapillar von unten. Alternativ wäre eine Verlegung von Tropfschläuchen im Substrat denkbar, wie derzeit im mediterranen Klimaraum praktiziert. Die Praxis zeigt jedoch, dass es sehr schwierig ist, im lockeren Substrat eine ordentliche parallele Verlegung herzustellen und vor allem ist die Wasserverteilung auf Grund des durchlässigen Dachsubstrates schlecht. Gegensteuern könnte man, indem ein Material mit höherer Wasserspeicherung verwendet wird. Dies hätte jedoch wiederum negative Auswirkungen im Hinblick auf eine beschleunigte Vegetationsumbildung. 10 cm Aufbauhöhe reichen grundsätzlich nicht aus um eine ordentliche Wasserverteilung zu erreichen. Die Verlegeabstände müssen sehr eng gewählt werden (25 cm!) um hierbei ordentliche Ergebnisse zu erzielen. Dennoch geht ein erheblicher Teil Wasser verloren, da die Aufnahme im Substrat nicht schnell genug erfolgt. Daher fiel die Wahl auf die Bewässerung mittels Dochtvlies und darunterliegender Wasserspeicher- und Verteileinrichtung. An dem Vlies hängen Dochte nach unten, welche kapillar Wasser nach oben fördern können.

**Drainage-, Wasserspeicher- und Verteilebene:** Um die Tropfschlauchabstände mit größerem Abstand realisieren zu können, wird in dieser Ebene neben einer Wasserspeicherung auch die Wasserverteilung realisiert. Bevor das Wasser ein Element von 1 x 2 m verlässt (Überlaufen) erfolgt erst einmal die Füllung aller Speicherkammern, selbst bei Gefälle. Dies wird erreicht, indem unterschiedlich hohe Stege „Abteilungen“ bilden. In Verbindung mit einem speziellen Tropfschlauch, welcher alle 10 cm ein Tropferelement besitzt, kann so erreicht werden, dass z.B. nur alle 100 cm ein Tropfschlauch erforderlich ist. Näheres hierzu kann in der ZinCo-Dokumentation nachgelesen werden.

**Schutzschicht:** In dieser Ebene braucht kein weiteres Wasser gespeichert zu werden. Es stünde den Pflanzen nicht zur Verfügung. Daher reicht es aus, die reine Schutzfunktion zu realisieren. Im Vergleich zum „Sedum-Teppich“ eine Gewichtsersparnis von ca. 5 kg/m<sup>2</sup>.

**Wurzelfeste Dachabdichtung:** Hier ist im Vergleich zum Sedum-Teppich keine Veränderung erforderlich.

**Tragkonstruktion:** Der neue Aufbau „Verdunstungsmaximiertes Gründach“ wiegt wassergesättigt ca. 180 kg/m<sup>2</sup>, d.h. es werden höhere Ansprüche an die Statik gestellt wie bei einer

Sedum-Begrünung ohne oder mit Bewässerung. Allerdings sind die statischen Ansprüche noch deutlicher geringer wie bei einer Intensivbegrünung.

### 7.3.3 Grundlagen der Kalkulation

Es wird davon ausgegangen, dass bei rechtzeitiger Planung für ein Cool Roof zur ersten Herstellung keine zusätzlichen Kosten entstehen, im Vergleich zur Herstellung der Abdichtung für ein Gründach. Daher erfolgt die Betrachtung für alle Lösungsansätze ab dem Zeitpunkt der bereits fertiggestellten Dachabdichtung. Die Baustellenlogistik bleibt in allen Fällen unberücksichtigt. Es wird von einer guten Erreichbarkeit sowie einem dreigeschossigen Gebäude sowie Mitnutzung von Gerüst und Baukran ausgegangen.

#### 7.3.3.1 Materialkosten für die Installation von Dachbegrünungssystemen

In Tab. 7.16 sind die Materialkosten für eine *Sedum*-Begrünung ohne bzw. mit Bewässerung sowie für ein verdunstungsmaximiertes Gründach aufgeführt. Die Zahlen beruhen auf aktuellen Listenpreisen der ZinCo GmbH und sind kalkuliert für ein Dach mit 1000 m<sup>2</sup> Grundfläche ohne Durchdringungen. Bei allen Systembestandteilen – mit Ausnahme der Bewässerung für die eine Lebensdauer von 10 bis 15 Jahren anzusetzen ist – ist von einer Lebensdauer von mindestens 50 Jahren auszugehen.

**Tab. 7.16: Materialkosten (Listenpreise in €/m<sup>2</sup>, Stand 12/2015) anhand eines fiktiven Daches mit 1000 m<sup>2</sup> (Grundriss 50 x 20 m, keine Dachdurchdringungen)**

Systembestandteil	Sedum-Begrünung		Verdunstungsmaximiertes Gründach mit Kräuter/Gräser-Vegetation
	unbewässert	bewässert	
Schutzschicht	2,60	2,60	2,80
Drainageebene	11,25	11,25	20,70
Filterschicht	1,00	1,00	9,70
Vegetationstragschicht	5,40	5,40	9,00
Vegetation	1,25	1,25	7,00
Bewässerung	-	7,20	7,20
<b>Summe</b>	<b>21,50</b>	<b>28,70</b>	<b>56,40</b>

### 7.3.3.2 Arbeitsaufwand für Installation und Pflege bei Gründächern

Der Arbeitsaufwand für die Installation beruht auf Erfahrungswerten der ZinCo GmbH und basiert wie bei den Materialkosten auf einem Dach mit 1000 m<sup>2</sup> Grundfläche ohne zusätzliche Durchdringungen.

**Tab. 7.17 Arbeitszeitbedarf (min/m<sup>2</sup>) für die Installation der Begrünungssysteme anhand eines fiktiven Daches mit 1000 m<sup>2</sup>, Grundriss 50 x 20 m, keine Dachdurchdringungen (Verlege- und Pflanzzeiten basierend auf Erfahrungswerten der Fa. ZinCo)**

Systembestandteil	Sedum-Begrünung		Verdunstungsmaximiertes Gründach mit Gräser-Kräuter-Vegetation
	unbewässert	bewässert	
Schutzschicht	0,5	0,5	0,5
Drainageebene	1,0	1,0	1,2
Filterschicht	0,5	0,5	1,7
Vegetationstragschicht	1,5	1,5	2,5
Vegetation	1,0	1,0	5,0
Bewässerung (Erstinstallation)	-	4,7	3,1
Bewässerung (Instandsetzung)		4,7	4,7
<b>Summe</b>	<b>4,5</b>	<b>13,9</b>	<b>18,7</b>

Der Arbeitsaufwand für die Pflege beruht auf Erfahrungswerten der technischen Leitung der Hochschule Weihenstephan/Triesdorf sowie der Fa. ZinCo (Tab. 7.18). Außerdem ist der Abtransport des Materials zu berücksichtigen. Aufgrund unterschiedlicher Mengen sind dafür laut Erfahrungen der Fa. ZinCo je 1000 m<sup>2</sup> für das unbewässerte Sedum-Dach 50,- Euro, für das bewässerte Sedum-Dach 250,- Euro und für die Kräuter/Gräser-Vegetation 600,- Euro anzusetzen.

**Tab. 7.18: Arbeitszeitbedarf (min/m<sup>2</sup>) für die jährliche Pflege**

Tätigkeit	Sedum-Begrünung		Verdunstungsmaximiertes Gründach mit Gräser-Kräuter-Vegetation
	unbewässert	bewässert	
Abmähen der Vegetation im Herbst oder zeitigen Frühjahr sowie Abrechen und in geeignete Bags (dachrandnah) bereitstellen (Gebäude anfahrbar mit LKW-Ladekran)	-	-	1,8
Entfernen von Bewuchs, Laub und Unrat im Rand- und Sicherheitsstreifen (2 x jährlich)	0,6	1,0	0,6
Entfernen von nicht standortgerechtem Fremdaufwuchs, incl. Laub und Unrat	1,2	4,0	0,2
Kontrolle der Bewässerung (2 x jährlich)		0,3	0,3
Düngung	0,2	0,2	0,2
Inbetriebnahme der Bewässerung	-	0,5	0,5
Winterfestmachen der Bewässerung	-	0,5	0,5
<b>Summe</b>	<b>2,0</b>	<b>6,5</b>	<b>4,1</b>

### 7.3.3.3 Installations- und Instandsetzungskosten für ein Cool Roof

Für den Erhalt während 50 Jahren wird für das Cool Roof während dieses Zeitraums neben der immer wieder erforderlichen Erneuerung der weißen Farbe (im Mittel alle zehn Jahre) von einer einmal erforderlichen kompletten Sanierung der Dachabdichtung nach 25 Jahren ausgegangen. Bei der ersten Herstellung wird wie zu Beginn des Abschnitts beschrieben das Baugerüst mitgenutzt. Dies ist bei einer Sanierung nicht mehr möglich und daher zusätzlich zu stellen. Trotz der regelmäßigen Erneuerung der Abdichtung bzw. der Erneuerung der weißen Farbe ist eine regelmäßige Reinigung des Cool Roof unumgänglich, da ansonsten die Reflektion durch die Besiedlung mit Mikroorganismen sowie Staubablagerungen sehr stark zurückgeht. Hierfür wird ein jährlicher Arbeitszeitbedarf von 1 Minute je m<sup>2</sup> angesetzt. Wie bei den Kalkulationen für die Dachbegrünung liegt der Kalkulation ein Dach mit 1000 m<sup>2</sup> Grundfläche ohne zusätzliche Durchdringungen zugrunde.

**Tab. 7.19: Arbeits- und Materialkosten für die Instandsetzung eines Cool Roofs (Angaben basieren auf Angaben von ausführenden Betrieben und Erfahrungen der Fa. ZinCo)**

<b>Tätigkeit</b>	<b>Kosten in €/m<sup>2</sup></b>
Instandsetzung Cool Roof (Abdichtung)	25,0
Instandsetzung An- und Abschlussbereiche Cool Roof (Abdichtung)	11,2
Gerüststellung für Instandsetzung Cool Roof (Abdichtung)	12,0
Instandsetzung Cool Roof - Farbe (ist ca. alle zehn Jahre notwendig)	10,0
<b>Summe</b>	<b>58,2</b>