

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

Untersuchung von einem einschichtigen, extensiven Dachsubstrat mit Biokohle und lokalen, wiederverwerteten organischen und mineralischen Komponenten



Experimentelle Kleindächer im Versuchsgelände (Foto: Rösli, Mai 2021).

Masterarbeit
Carmela Winter
Masterstudiengang 2019
Studienrichtung Umwelt und Natürliche Ressourcen
Abgabedatum: 14. Juli 2021

Fachkorrektorinnen:

Dr. Chiara Catalano
ZHAW, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, 8820 Wädenswil

Nathalie Baumann
ZHAW, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, 8820 Wädenswil

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank meinen beiden Mentorinnen Chiara Catalano und Nathalie Baumann, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet haben. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank gilt auch Salvatore Pasta, welcher mit seinem grossen botanischen Wissen einen wichtigen Beitrag zu meiner Arbeit geleistet hat.

Danken möchte ich auch Rahel Wanner und Luca Meyer, welche mich beim methodischen Vorgehen im Labor unterstützt haben.

Weiter möchte ich mich bei allen Lieferanten bedanken, durch deren grosszügige Offerten, das Umsetzen dieser Arbeit erleichtert haben. Dieser Dank gilt der RICOTER Erdaufbereitung AG und Herr Abächerli von der Bionika AG sowie Alexander Grädel vom Spycher Handwerk Huttwil und dem Landwirt Philipp Räber.

Ausserdem möchte ich mich bei Bahar Yildirim, Catherine Brunner und Carla Winter für das Korrekturlesen meiner Masterarbeit bedanken.

Nicht zuletzt möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Familie Carla, Lars, Laura und Nils Winter sowie Elias Rösli bedanken, die mir während meiner ganzen Studienzeit beigestanden haben und ohne die das Umsetzen dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Sie haben tatkräftig beim Transport und Aufbau der Versuchsanlage mitgeholfen, haben mich in strengen Zeiten kulinarischen verköstigt und mental unterstützt.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	3
1.1	Forschungsstand	3
1.1.1	Ökologischer Wert von Gründächer	3
1.1.2	Nachhaltigkeit und ökologische Auswirkung verwendeter Baustoffe	3
1.1.3	Biokohle als Gründachkomponente	4
1.1.4	Schafswolle, ein ungenutzter Rohstoff	5
1.2	Forschungslücken	6
1.2.1	Geeignete Dünger für Dachbegrünung	6
1.2.2	Schafswolle als Gründachkomponente	7
1.2.3	Wechselwirkung einer bimodalen, organischen Gründachkomponente	7
1.3	Ziele und Forschungsfragen	8
2	Material & Methoden	10
2.1	Versuchsumgebung und Standortwahl	10
2.2	Anforderungen an den Aufbau von Vegetationsflächen	11
2.3	Substratkomponenten	11
2.3.1	Feinanteile	12
2.3.2	Mineralisches Gerüst aus Feldstein	13
2.3.3	Schafswolle als organischen Düngezusatz	13
2.4	Schichtaufbau der experimentellen Kleindächer	14
2.5	Versuchsaufbau	16
2.6	Extensive Bepflanzung	17
2.7	Untersuchungsgrössen und Probenahme	19
2.7.1	Sickerwasserproben	20
2.7.2	Bodenstrukturparameter	20
2.7.1	Nährstoffanalysen	21
2.7.2	Vegetationsaufnahmen	23
2.7.3	Litter Bag Experiment	24
2.8	Statistische Auswertung	25
3	Resultate	27
3.1	Substratanalysen	27
3.1.1	Bodenstrukturparameter	27
3.1.1	Abbaurrate von Schafswolle	30
3.1.1	Nährstoffanalysen	30
3.2	Sickerwasseranalysen	33
3.2.1	pH-und elektrische Leitfähigkeit	33
3.2.2	Ionenkonzentration im Sickerwasser	35
3.3	Vegetationsentwicklung	39
3.3.1	Ausgesäte und spontane Arten: Keimungs- und Etablierungsrate	39
3.3.2	Kleindach-Aufbauleistung	40
3.3.3	Ökologie der Kleindächer	41
4	Diskussion	45
4.1	Bodenstruktur und Bodentextur	45
4.2	Nährstoffanalysen	47
4.2.1	Der Einfluss von Biokohle auf die chemischen Prozesse im Substrat	47
4.2.1	Der Einfluss von Schafswolle auf die chemischen Prozesse im Substrat	48
4.2.2	Wechselwirkung von Biokohle und Schafswolle	50
4.3	Vegetation	52
4.3.1	Gefundene Arten	52
4.3.2	Leistungsfähigkeit der Kultursubstrate	52
5	Schlussfolgerung	55
	Bibliographie	57
	Anhang	63

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Standort und Klimanormwerte der Versuchsanlage.....	10
Abbildung 2: Karte des süd-östlich ausgerichteten Versuchsgelände.....	10
Abbildung 3: Verwendete Substratkomponenten	12
Abbildung 4: Schematische Prozessdarstellung der Doppelschnecken- Pyrolyseanlage.....	13
Abbildung 5: Schichtaufbau eines experimentellen Kleindachs	15
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung im Feld.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 7: Die Drohnenaufnahme der Versuchsanlage im Feld.....	16
Abbildung 8: Methodisches Vorgehen für die Analyse der Dachsubstrate mit organischer Schicht. ...	19
Abbildung 9: Resultate zum Wasserhaushalt sowie FLL- Anforderungsbereich für WKmax	27
Abbildung 10: Resultate zum Lufthaushalt sowie FLL-Anforderungsbereich	28
Abbildung 11: Korngrößenverteilung der Ausgangssubstrate und der verwendeten Feldsteine.	29
Abbildung 12: Korngrößenverteilung der Testvarianten und FLL- Anforderungsbereich	29
Abbildung 13: Korngrößenverteilung der Kontrollvarianten	30
Abbildung 14: Unmittelbar lösliche Fraktionen der Nährelemente	31
Abbildung 15: Nährstoff-Totalgehalte.	32
Abbildung 16: Darstellung der C-Spezies: Corg und Ctot	33
Abbildung 17: Durchschnittliche elektronische Leitfähigkeit im Sickerwasser und mittlere totale Ionenkonzentration für alle Faktorstufen.....	34
Abbildung 18: Mittlere Ionenkonzentration aus der Gesamtsumme aller gemessenen Ionen für alle Varianten	35
Abbildung 19: Veränderung der Kaliumkonzentration durch Vorbehandlung.....	36
Abbildung 20: Zeitliche Variation der Ionenzusammensetzung im Sickerwasser	37
Abbildung 21: Durchschnittliche Anzahl Arten pro Plot und Bedeckungsgrad	41
Abbildung 22: Bedeckung (%) von Ruderal- und Stresstrategen pro Parzelle.....	43
Abbildung 1: Verteilung der Konkurrenzstrategien aller beobachteten Pflanzenarten.....	44
Abbildung 24: Landolt`s Ökologische Zeigerwerte und Lebensformen	44
Abbildung 25: Rhizosphäre im woll-und biokohlehaltigen Wachstumsmedium.....	45
Abbildung 26: Waschprozess Wollwäscherei Spycherhandwerk	72

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Dreifaktorieller Versuchsaufbau	16
Tabelle 2: Zusammensetzung aller Testvarianten, Kontrollen und Ausgangssubstrate	17
Tabelle 3: Lebensformen (LF), Ökologische Zeigerwerte (EIVs) und Konkurrenzstrategien (KS) der eingeführten Arten nach Landolt	18
Tabelle 4: Teilfragen mit dazugehörigen Vergleichsgruppen für statistische Auswertung	
Tabelle 5: Durchschnittliche Luftkapazität bei WKmax und bei pF 1.8.....	27
Tabelle 6: Volumengewichte bei WKmax und im trockenen Zustand	28
Tabelle 7: Durchschnittliche elektrische Leitfähigkeit (EC) und pH- Wert des Sickerwassers und der Bodenlösung.....	33
Tabelle 8: Effekt der Schafswolle auf die mittleren Ionenkonzentrationen	38
Tabelle 9: Pflanzenliste eingeführte und spontane Arten sowie deren Deckungsgrad und Häufigkeit .	39
Tabelle 10: Statistische Auswertung der Vegetationsbedeckung und Artenzusammensetzung	40
Tabelle 11: Lebensformen (LF), Ökologische Zeigerwerte (EIVs) und Konkurrenzstrategien (KS) aller gefundenen Arten nach Landolt	42
Tabelle 12: Zusammenstellung relevanter Ergebnisse gekoppelt mit den dazugehörigen Anforderungen der FLL-Richtlinien.....	63
Tabelle 13: Nachweisgrenze der Ionenchromatographie	73
Tabelle 14: Vegetationsaufnahme: Liste aller Arten und Deckungsgrad.....	74

ABBKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BK	Biokohle, Pflanzkohle, karbonisierte Biomasse
BK ⁺	Varianten mit geladener, aktivierte und Co-kompostierter Biokohle
BK ⁻	Varianten mit reiner, ungeladener Biokohle
BKn	Kontrollvarianten ohne Biokohle
EC	elektrische Leitfähigkeit
GPV	Gesamtporenvolumen
LK	Luftkapazität
PV _{pF 1.8}	Grobporenvolumen bei Saugspannungskraft von pF = 1.8
ρ	Rohdichte/ Volumengewichte
SW ^m	Schafswolle wurde als mittlere Schicht eingebaut
SW ^u	Schafswolle wurde als unterste Schicht eingebaut
SW ⁺	vorbehandelte, gewaschene Schafswolle
SW ⁻	nicht behandelte, ungewaschene Schafswolle
WK _{max}	maximale Wasserhaltekapazität
W _n	laborverdichtete Bodenprobensamples ohne nachträglichem Schafswolleinbau
W _y	laborverdichtete Bodenprobensample mit nachträglichem Schafswolleinbau

ABSTRACT

To increase the ecological value of green roofs and raise their economical attractiveness at the same time, the use of sustainable and local raw materials for green roof substrates becomes more significant. At the same time, due to the critical nutrient loads, the implementation of suitable fertilizer on green roofs must be conducted sensitively.

The objective of this thesis was to investigate a single-layer extensive green roof substrate that corresponds to current sustainability needs. In this study, local waste sheep wool (SW), an increasingly less utilized resource, was used as an organic fertilizer component. In the bimodal composition with biochar (BK), which is considered to have a positive effect on the water, air and carbon cycles, as well as on nutrient retention, a sustainable availability of nutrients with simultaneously low leaching risk should be ensured. For the mineral component, a coarse rock material was used, which was obtained as a by-product of local harvesting processes.

The test site contained 24 small experimental roofs consisting of sheep wool, biochar and field stones. The experiment was performed and monitored for five months (March to June 2021). Different pre-treatments of the materials as well as a variation of installation locations were tested.

The performance monitoring was based on chemical leachate analyses, investigations of nutrient availability and vegetation success, as well as the examination of physical parameters of soil structure.

The results compared to the requirements provided by the FLL guidelines (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau, 2018), indicated that the application of most test substrates would be possible in practice. The addition of BK, as well as the integration of SW, showed a consistently positive effect on the water and air regime, as well as on the soil texture. Regarding the chemical processes in the substrate, the pre-treatment and the layering of the materials proved to be critical variables. In the composition of non-composted BK with pre-treated, washed wool, the lowest nutrient stocks were leached, while at the same time a considerable nutrient availability for plants was observed, which was particularly evident in the establishment of ruderal species.

On the other hand, an oversaturation of the ionic exchange capacity was observed due to the addition of nutrient-loaded BK with the organic fertilizer SW. Due to excessive leachate, a bimodal organic green roof component consisting of loaded biochar and unwashed SW must be rejected. Furthermore, the total ion losses from the substrate into the leachate showed the advantages of a mid-layer location of SW.

The use of co-composted BK as a uni-modal, organic component of green roof substrates must be clarified in further studies

Keywords: single-layer extensive green roof substrate, biochar, loaded biochar, co-composted biochar, sheep wool, field stones, organic fertilizer, soil structure, nutrient availability, leaching risk, biodiversity enhancement, alternative green roofs

ZUSAMMENFASSUNG

Um den ökologischen Nutzen von Gründächern zu steigern und diese gleichzeitig ökonomisch attraktiver zu machen, sollen Dachsubstrate vermehrt auf nachhaltigen und lokalen Rohstoffen basieren. Gleichzeitig ist aufgrund der grossen Schadstoffbelastung durch das austretende Sickerwasser, die Umsetzung von geeigneten Düngerbevorratungen auf Gründächern sensibel auszuführen. Das Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung eines einschichtigen, extensiven Gründachsubstrates, welches den aktuellen Nachhaltigkeitsbedürfnissen entspricht und gleichzeitig eine langfristige Nährstoffverfügbarkeit sicherstellt. In dieser Studie wurde lokale Schafswolle (SW), eine immer weniger genutzte Ressource, als organische Düngekomponente verwendet. In der bimodalen Zusammensetzung mit Biokohle (BK), welcher eine positive Wirkung auf den Wasser- und Lufthaushalt sowie auf die Nährstoffretention zugesprochen wird, soll eine langfristige Nährstoffverfügbarkeit, bei gleichzeitig geringem Auswaschungsrisiko sichergestellt werden. Für die strukturgebende, mineralische Komponente wurde ein Gesteinsmaterial verwendet, welche als Nebenprodukt bei lokalen Ernteverfahren gewonnen wird.

Für den Versuch sind 24 Kleindächer bestehend aus Schafswolle, Biokohle und Feldsteinen während fünf Monaten (März bis Juni 2021) untersucht worden. Dabei wurden unterschiedliche Vorbehandlungen der Materialien und verschiedene Einbaulokalitäten getestet.

Die Erfolgskontrolle basierte auf chemischen Sickerwasseranalysen, Untersuchungen der Nährstoffverfügbarkeit und dem Vegetationserfolg sowie der Überprüfung von bodenphysikalischen Parametern. Eine Orientierung der Resultate an denen von der FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau, 2018) vorgesehenen Kennwerte zeigte, dass die Verwendung der meisten Testsubstrate in der Praxis möglich ist.

Der Zusatz von BK und der Einbau von SW zeigte einen durchgehend positiven Effekt auf den Wasser- und Lufthaushalt sowie auf die Bodentextur. Im Hinblick auf die chemischen Prozesse im Substrat erwiesen sich die Vorbehandlung sowie auch die Schichtungen als entscheidende Variablen. Bei der Kombination aus nicht nährstoffgeladener BK mit gewaschener Wolle wurden die geringsten Nährstoffvorräte ins Sickerwasser abgegeben.

Umgekehrt war durch die Anreicherung von nährstoffgeladener BK mit dem organischen Dünger eine Übersättigung der Ionenkapazität des Substrates zu beobachten. Aufgrund von einer zu hohen Sickerwasserbelastung ist diese zweiteilige, organische Gründachkomponente deshalb zu verwerfen. Die Ionenverfrachtung vom Substrat ins Sickerwasser zeigte ausserdem, dass eine mittlere Einbaulokalität von Wolle zu bevorzugen ist. Die Verwendung von Co-kompostierte BK als unimodale, organische Komponente von Dachkultursubstraten soll in weiteren Studien geklärt werden.

Schlüsselwörter: einschichtiges, extensives Gründachsubstrat, Biokohle, geladene Biokohle, Co-kompostierte Biokohle, Schafswolle, Feldsteine, organischer Dünger, Bodenstruktur, Nährstoffverfügbarkeit, Auswaschungsrisiko

1 EINLEITUNG

1.1 FORSCHUNGSSTAND

1.1.1 Ökologischer Wert von Gründächer

Das öffentliche und wissenschaftliche Interesse an Gründächern hat in den letzten Jahren rasant zugenommen, dies als Folge der vielfältigen sozialen (gestalterische Verbesserung des Wohn- und Arbeitsumfeldes), wirtschaftlichen (Stadtplanung, Schutzfunktionen) und ökologischen Vorteile, die den grünen Infrastrukturen zugeschrieben werden (A. J. Bates et al., 2013). So liefern Gründächer wichtige Ökosystemleistungen, welche für eine nachhaltige, klimaadaptive Stadtentwicklung relevant sind (Kuoppamäki et al., 2016). Gleichzeitig geraten urbane Ökosysteme durch den Klimawandel und den rasanten, städtischen Bevölkerungsanstieg vermehrt unter Druck (Beck et al., 2011; Kuoppamäki & Lehvävirta, 2016). So bedeuten extreme Trockenheit und Hitzeperioden physiologischen Stress für Grünflächen, insbesondere für Dachbepflanzungen.

Die ökologischen Funktionen und Wirkungen von Gründächer sind unter anderem:

- die Behebung **negativer Folgen von Bebauung und Versiegelung** (bspw. Regenwasserrückhalt, Abflussverzögerung, verbesserte Evapotranspiration, Schadstoffreduzierung, etc.) (Akther et al., 2018; Castleton et al., 2010; Chen et al., 2018a; Gong et al., 2019; Oberndorfer et al., 2007)
- die **Verbesserung des Mikroklimas** (bspw. durch den Ausgleich von Temperaturextremen in Innen- und Aussenräumen, Kühlungseffekt auf Gebäude und Isolation, Verminderung der «Urban-Heat-Island»-Effekte, Erhöhung der Luftfeuchtigkeit, etc.) (Akther et al., 2018; Loibl et al., 2021)
- die Schaffung von Bezugsflächen und **Mikrohabitate für Flora und Fauna** sowie einen Beitrag zur **Erhaltung der Biodiversität** (A. J. Bates et al., 2013; Catalano et al., 2021).
- die **Sequestrierung von Kohlenstoff** in Pflanzenbiomasse und Substrat (Eksi et al., 2020; Getter et al., 2009)

1.1.2 Nachhaltigkeit und ökologische Auswirkung verwendeter Baustoffe

Der Netto-Umweltnutzen bei einer Gründachkonstruktion ist zusätzlich abhängig von dem Einsatz der Ressourcen und es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, was die Verwendung von Materialien angeht (Vefago & Avellaneda, 2013). Durch die ansteigende Ressourcenverknappung natürlicher Rohstoffe wird es immer wichtiger, herkömmliche Baustoffe zu überdenken und den Life Cycle bereits verwendeter Baumaterialien auszuweiten (Bozorg et al., 2015). Bei der Auswahl der Baustoffe muss

ausserdem ihre Wirkung auf die organischen Substratkomponenten und die Vegetationsformen berücksichtigt werden (Eksi et al., 2020).

Um den Nachhaltigkeitsnutzen von Gründächern auf ökologischer, aber auch ökonomischer Ebene weiter zu steigern und gleichzeitig den CO₂-Fussabdruck von Gründachbaustoffen durch Produktion und Transport zu minimieren, sollen für das Substrat mehr lokale und rezyklierte Produkte verwendet werden (Eksi et al., 2020; Sutton, 2018). So verweist der Klimaadaptionsbericht von Malmö (Swedish Environmental Research Institute Ltd. (IVL), 2014) in einer Langzeitstudie, wie durch die Verwendung von alternativen Gründächern, welche nur auf lokalen Komponenten basieren, nicht nur die ökologische Nachhaltigkeit, sondern auch die Lebensfähigkeit von Gründächern insgesamt verlängert werden konnte. Nebst dem Erreichen von Nachhaltigkeitszielen, sollen mit dem Nutzen von lokalen Abfallprodukten auch traditionelle Probleme wie hohe Wartungskosten und komplexe Konstruktionen minimiert werden und damit Gründächer für Privatbesitzer zugänglicher gemacht werden (Eksi et al., 2020).

Die Notwendigkeit für die Verwendung von alternativen, umweltfreundlichen Gründachkomponenten zeigt sich ausserdem im Zusammenhang mit der Artenvielfalt (Brenneisen, 2003). Die Anpassung der Spinnen- und Käferfauna an natürliche Substratanteile, welche beispielsweise aus nahegelegenen Flussbänken stammen, ist ein wesentlicher Faktor für die Bildung von naturnahen Lebensräumen und Mikrohabitaten auf den Dächern.

1.1.3 Biokohle als Gründachkomponente

Biokohle (BK), bestehend aus karbonisierten Biomasseabfällen, deren Kohlenstoffgehalt durch einen thermischen Behandlungsschritt erhöht worden ist (Quicker & Weber, 2016) bietet als Substratkomponente einige Vorteile in der Anpassung an den Klimawandel. Die erhöhte Wasserhaltekapazität, aber auch die positive Wirkung auf den Rückhalt von Nährstoffen von Gründachsubstraten mit BK zeigen grosses Potenzial, auch in Zeiten von extremer Trockenheit eine gesunde Vegetation hervorzubringen (Beck et al., 2011; Cao et al., 2014; Chen et al., 2018b). Ausserdem ist der in der BK enthaltene Kohlenstoff stabil und wird im Substrat nur langsam abgebaut, (Chen, Ma, Wang, et al., 2018; Haubold-Rosar et al., 2016) was zu einer erhöhten Kohlenstoffsequestrierung führt. Die Zurückführung von pyrolisierter Biomasse in den Boden gilt somit als mögliche Strategie zur Abschwächung des Klimawandels (Roberts et al., 2010). Studien konnten zeigen, dass sich durch die Herstellung und Verwendung von Pflanzenkohle eine positive, reduzierende Wirkung auf den Treibhauseffekt ergibt (Obersteiner et al., 2015) und wie der Einsatz von Pflanzenkohle in unterschiedlichen Bereichen zur städtischen Klimaneutralität beitragen kann (Swedish Environmental Research Institute Ltd. (IVL), 2014).

Pflanzenkohle kann aus jedem biogenen Abfallprodukt durch Erhitzung hergestellt werden. Der Karbonisierungsprozess verläuft zudem autotherm, daher entstehen nur geringe Abgasemissionen (Quicker, 2016). Durch die lokale Produktion können zudem lange Transportwege verhindert werden. Die energieeffiziente und lokale Herstellung der Pflanzenkohle aus organischen Grünabfällen, macht die Substratkomponente nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch wertvoll (Roberts et al., 2010).

Zusammengefasst ergeben sich somit folgende Vorteile von BK:

- **eine hohen Adsorptionsfähigkeit:** verbessert die Porosität, ist leicht und erhöht die Wasserspeicherkapazität (Beck et al., 2011; Cao et al., 2014; Chen et al., 2018b; Kaudal et al., 2016; Mulcahy et al., 2013).
- **eine hohe Kationenaustauschkapazität:** bindet Nährstoffe und vermindert starke Auswaschung (Beck et al., 2011; Goldschmidt, 2018; Kaudal et al., 2016; Nemati et al., 2015).
- **fördert die Kohlenstoffsequestrierung:** enthält stabilen Kohlenstoff (Azzi et al., 2019; Chen et al., 2018b; Haubold-Rosar et al., 2016).
- **eine energieeffiziente und lokale Herstellung:** BK ist ökologisch und ökonomisch wertvoll (Weber et al., 2016).

1.1.4 Schafswolle, ein ungenutzter Rohstoff

Die weltweite Wollproduktion ist aufgrund der geringen Nachfrage im Textilbereich in den letzten zwei Jahrzehnten stark gesunken (Rajabinejad et al., 2019). Der Textilmarkt ist weitgehend gesättigt, weshalb Schafswolle (SW) zu einer unterschätzten und ungenutzten Ressource geworden ist (Sharma et al., 2019). Deshalb wird intensiv nach Lösungen für die Aufwertung von Wollabfällen in anderen Industriezweigen geforscht (Rajabinejad et al., 2019). Aufgrund des hohen Nährstoffgehaltes wird SW bereits in verschiedenen Landwirtschafts- und Kultivierungsstudien als organisches Düngemittel zur Ertragssteigerung untersucht (Górecki & Górecki, 2019; Zheljzkov et al., 2009, Abdallah et al., 2019b). SW konnte dabei nachweislich als wichtiger Stickstofflieferant identifiziert werden. Weiter enthält sie viele essentielle Nährstoffe wie Phosphor (P), Kalium (K) und Calcium (Ca) sowie Spurennährstoffe wie Cu, Zn, and Mn (Abdallah et al., 2019b; Koch et al., 2015).

Bei der Verwendung des organischen Düngemittels spielt ausserdem die Zersetzungsresistenz des Materials eine wichtige Rolle. Eine resistente Cuticula (äusserste Zellschicht), welche die Wollfasern umschliesst, hemmt den biologischen Abbau (Broda et al., 2016), was zu einer verzögerten Abbaurate führt und damit eine fortlaufende Mineralisierung sicherstellt. Die Pflanzen werden dadurch nachhaltig mit ausreichend Stickstoff versorgt (Górecki, R. S., & Górecki, 2019; Koch et al., 2015). Zusätzlich soll SW bodenphysikalischen Eigenschaften, wie Gesamtporosität und Wasserkapazität verbessern (Abdallah et al., 2019a; Sharma et al., 2019).

1.2 FORSCHUNGSLÜCKEN

Inwiefern Gründachflächen in der Praxis adäquat gestaltet werden sollen, um deren ökologische Potenziale optimal zu entfalten, ist Gegenstand vieler Studien und es bestehen immer noch grosse Wissenslücken zwischen den verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen, welche an der Umsetzung von grünen Infrastrukturen mitwirken (Semeraro et al., 2021). So gilt es die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Ökosystemelementen von Gründächern, insbesondere die Beziehungen zwischen Nährboden, Bodenbiota und Vegetation besser zu verstehen (Oberndorfer et al., 2007).

1.2.1 Geeignete Dünger für Dachbegrünung

Die Nährstoffverfügbarkeit ist ein entscheidender Faktor bei der Vegetationsentwicklung, so ist die Pflanzenbiomasse insgesamt, aber auch die Qualität der einzelnen Arten eng mit dem Ernährungszustand der Pflanze verbunden. Ein unzureichender (d. h. übermässiger oder mangelhafter) Nährstoffgehalt in den Kultursubstraten führt häufig zu einer deutlichen Abnahme der Pflanzenbiomasse sowie zu einer geringen Pflanzenqualität und Empfindlichkeit gegenüber abiotischen oder biotischen Stressfaktoren (Krawczyk et al., 2017). Die Sicherstellung einer nachhaltigen Nährstoffverfügbarkeit auf Gründächern ist aber oft eine Herausforderung, da die Wachstumsmedien dieser künstlichen Ökosysteme häufig aus dünnen Auflageschichten bestehen und mit weniger als 20% organischer Substanz in Kombination mit groben Materialien, eine grosse Durchlässigkeit und eine geringe Kationenaustauschkapazität aufweisen.

Zusätzlich müssen Dachsubstrate ein Gleichgewicht zwischen dem effektiven Nährstoffbedarf und der austretenden Sickerwasserqualität sicher stellen (Whittinghill et al., 2016). Während begrünte Dächer zwar allgemein die Qualität des abfliessenden Wassers im Vergleich zu einem konventionellen Dach verbessern (Berndtsson et al., 2006), hängt diese reinigende Wirkung massgeblich von den Bewirtschaftungspraktiken ab. So kann bei der Einarbeitung von viel organischer Substanz und Dünger die jährliche Schadstoffbelastung von einem Gründach tatsächlich grösser sein als bei einem konventionellen Dach (Aitkenhead-Peterson et al., 2011).

In der Praxis sind kommerzielle Gründachsubstrate in der Regel bereits stickstoffhaltig konzipiert und enthalten nährstoffreiche Komponenten wie Kompost, damit eine erfolgreiche Etablierung der Pflanzengemeinschaft begünstigt wird, gleichzeitig entfalten solche Substrate aber keine Retentionswirkung, welche für die Sickerwasserqualität relevant sind (Buffam & Mitchell, 2015; Mitchell et al., 2018). In aktuellen Studien wird deshalb immer noch auf die Problematik von zu hohen Nährstoffkonzentrationen im abfliessenden Sickerwasser hingewiesen (Akther et al., 2018; Karczmarczyk et al., 2020). Laut der FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau, 2018) sind im Hinblick auf mögliche Umweltbelastungen durch Auswaschung daher die Nährstoffgehalte in Vegetationssubstraten möglichst gering zu halten.

Die verbesserte Speicherung von Mineralstoffen ist zwar ebenfalls eine wertvolle Eigenschaft von Pflanzenkohle (Beck et al., 2011; Goldschmidt, 2018; Kaudal et al., 2016), die Frage nach einer nachhaltigen Verfügbarkeit an Mineralstoffen und geeigneten Düngermethoden bleibt jedoch offen, da Pflanzenkohle kein Nährstofflieferant im eigentlichen Sinne darstellt.

1.2.2 Schafswolle als Gründachkomponente

Schafswolle wird bereits heute für die Ertragssteigerung verwendet (Górecki & Górecki, 2019; Abdallah et al., 2019b) und zeigte in verschiedenen Studien eine positive Wirkung auf die Biomasseproduktion und Bodenbeschaffenheit (Abdallah et al., 2019a; Górecki & Górecki, 2019; Zheljaskov et al., 2008). Es fehlen jedoch Untersuchungen, welche den Nutzen des organischen Düngemittels auf dem Dach untersuchen.

Grundsätzlich ist die Abgabe von Mineralstoffen ins Sickerwasser bei organischen Düngern insbesondere aufgrund komplexer Interaktionen mit einer entstehenden Vegetationsschicht schwieriger vorherzusehen als bei synthetischen Düngern (Koch et al., 2015). Um die Mineralfreisetzung ins abfließende Sickerwasser zu kontrollieren und regulieren sind daher einerseits Untersuchungen notwendig, welche die Mineralisierung des organischen Düngers und somit die Löslichkeit der Elemente analysieren. Zusätzlich haben Studien zur Verwendung verschiedener organischer Materialien als Substratkomponenten gezeigt, dass durch eine gezielte Vorbehandlung die chemischen und bodenphysikalischen Eigenschaften dieser Stoffe sowie die Nährstoffeffizienz besser kontrolliert werden kann (Xu et al., 2020, 2021). Es gilt also ebenfalls zu untersuchen, inwiefern eine Vorbehandlung der SW zu einer gezielten und moderaten Nährstofffreisetzung führen kann.

1.2.3 Wechselwirkung einer bimodalen, organischen Gründachkomponente

In einer Vorstudie «Biokohlesubstrat für Gründächer», welche durch Innosuisse finanziert und in Zusammenarbeit mit der ZHAW (Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften) und der RICOTER Erdaufbereitung AG durchgeführt wurde, ist erstmals die Entwicklung solcher biokohlehaltigen Dachsubstrate in Kombination mit Schafswolle untersucht worden (Catalano & Winter, 2020). Die aus der Vorstudie resultierten Fragen bilden die Grundpfeiler dieser Masterarbeit. In der Studie konnte aufgezeigt werden, dass BK die verschiedenen Bodenstrukturparameter zwar verbesserte, einen positiven Effekt der BK auf die Nährstoffversorgung konnte mit diesem Versuch aber nicht beschrieben werden.

Neuere Studien (Joseph et al., 2018; Teodoro et al., 2020) beschreiben, wie wichtig der Nährstoffstatus von Pflanzenkohle ist, bevor sie in bestimmte bodenbezogene Systeme eingebracht wird und das durch eine Co-Kompostierung der pyrolysierten Biomasse, die Kationen-Austauschkapazität der

Pflanzenkohlepartikel signifikant erhöht und damit das Auswaschungsrisiko von Nährstoffen minimiert werden kann. Durch den Aufladungsprozess werden die Poren und Oberflächen der nährstoffreaktiven BK geladen, womit die Nährstoffverfügbarkeit gesteigert wird (Joseph et al., 2018). Durch die biologische Aktivierung mit Mikroorganismen und einen Oxidationsprozess werden trotz hoher Kationenaustauschkapazität fixierte Mineralien für die Pflanzen verfügbar gemacht (Quicker, 2016; Schmidt, 2011). Gleichzeitig wird durch die Aktivierung durch Kompost die Mobilität von löslichen Schwermetallen reduziert (Ahmad et al., 2018; Teodoro et al., 2020).

Die Verwendung von aktivierter und aufgeladener BK in Bezug auf den Nährstoffrückhalt ist deshalb ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchung. Zusätzlich soll mit der Forschungsanlage der Effekt in einer bimodalen Zusammensetzung mit SW als Langzeitdünger sowie deren Wirkung auf die Substratstruktur untersucht werden. Dabei soll eine neue Variation von vorprozessierter und anders geschichteter SW zu einer moderateren und langfristigen Mobilisierung der Haupt- und Spurennährstoffe führen.

1.3 ZIELE UND FORSCHUNGSFRAGEN

Das Hauptziel der vorliegenden Masterarbeit umfasst die Untersuchung eines einschichtigen, biokohlenhaltigen Substrates, welches die vegetationstechnischen Eigenschaften eines extensiven Dachsubstrates nach den FLL- Richtlinien (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau, 2018) erfüllt und den heutigen Bedürfnissen nach der Verwendung von nachhaltigen Rohstoffen gerecht wird. Die Erfolgskontrolle basiert auf regelmässigen Sickerwasseranalysen, Vegetationsaufnahmen, Untersuchungen der Bodenstruktur sowie eine umfassende Prüfung umweltrelevanter Haupt- und Spurenelemente.

Bodenphysikalische und -chemische Untersuchungen

Im Rahmen der Masterarbeit werden vier Teilfragen (Tf) untersucht. Tf 1 bis 3 umfassen eine Analyse auf bodenphysikalischer und -chemischer Ebene:

- 1) Wie wirkt sich die Verwendung von vorprozessierter (Co-kompostierte und biologische aktivierte) Biokohle (BK⁺) im Substrat auf den Nährstoffrückhalt, die Bodenstruktur und die Stabilität des organischen Kohlenstoffs aus und wie unterscheidet sich die Wirkung zu ungeladener Biokohle (BK⁻)?

2) Wie unterscheidet sich die Wirkung von gewaschener Schafswolle (SW⁺) im Gegensatz zu unbehandelter Schafswolle (SW⁻) in Bezug auf die Haupt- und Spurennährstoffe und die Bodenstruktur?

3) Inwiefern beeinflusst die Schichtung der SW innerhalb des Substrates die Mobilisierung der Nährstoffe?

Hypothesen

Für die Tf 1 bis 3 werden folgende Hypothesen aufgestellt:

1) BK⁺ hat im Gegensatz zu BK⁻ einen positiven Effekt auf die Nährstoffretention, während BK⁺ und BK⁻ im Gegensatz zu den Substratvarianten ohne BK einen positiven Effekt auf die Bodenstruktur haben.

2) SW als organische Düngerkomponente hat ebenfalls einen positiven Effekt auf das Pflanzenwachstum, aber auch auf die Bodenstruktur. Simultan werden durch die Vorbehandlung der Schafswolle (SW⁺) zwar starke Auswaschungssignale im Sickerwasser reduziert, im Zusammenhang mit der Vorbehandlung ist aber kurzfristig ein geringerer Bedeckungsgrad und Vegetationserfolg zu erwarten.

3) Durch einen mittigen Einbau der Schafswolle (SW^m), können im Gegensatz zu einem Einbau der Schafswolle im untersten Layer (SW^u) Mineralauswaschungen reduziert werden.

Methodisches Entwicklungspotenzial

Da es sich um neuartige, einschichtige Substratvarianten mit Beigabe von organischen Komponenten handelt, sind im Hinblick auf die Probenahme und Laboranalysen Fortschritte zu erzielen. Eine grosse Herausforderung der Studie ist, die bodenphysikalischen Parameter ohne vergleichbare Referenzmethode adäquat abzuschätzen.

Die Tf 4 verfolgt daher eine methodische Entwicklung in Bezug auf die Probenahmen:

4) Wie sollen Bodenproben von einschichtigen, organischen Substraten entnommen werden, damit die Bodenstrukturparameter adäquat abgeschätzt werden können?

Durch die Entwicklung einer bisher ausstehenden Methode für alternative, einschichtige, organische Dachsubstrate zeigt sich eine verbesserte Abbildung des Feinanteils und der Korngrößenverteilung, welche sich a) innerhalb des FLL -Anforderungsbereiches befindet und b) die Verteilung der verwendeten, nicht ausgebrachten Ausgangsubstrate widerspiegelt. Dies resultiert in c) einer verbesserten Wasserspeicherkapazität, welche den vorgegebenen Kennwerten entspricht.

2 MATERIAL & METHODEN

2.1 VERSUCHSUMGEBUNG UND STANDORTWAHL

Ort: 6045 Meggen (LU)
Höhe m. ü. M.: 460 m
Höhenstufe: untermontan
Klimaregion: zentrales Mittelland
CH1903+/LV95: 2671144.0, 1210960.3 m

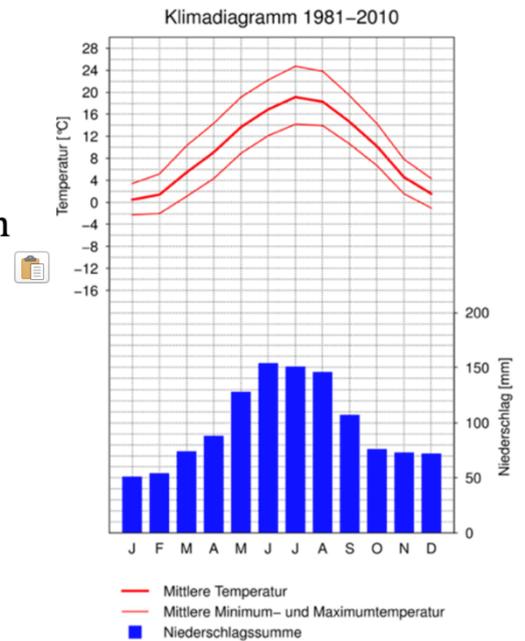


Abbildung 2. Standort der Versuchsanlage und Klimanormwerte der Messstation Luzern LUZ (Meteo Schweiz: <https://www.meteoschweiz.admin.ch/>, Zugriff: 08.01.2021)



Abbildung 3. Süd-Östlich ausgerichtetes Versuchsgelände in 6045 Meggen (www.google.ch/maps).

Die Versuchsanlage befindet sich unter freiem Himmel in einem Privatgarten in 6045 Meggen (

Ort: 6045 Meggen (LU)
Höhe m. ü. M.: 460 m
Höhenstufe: untermontan
Klimaregion: zentrales Mittelland
CH1903+/LV95: 2671144.0, 1210960.3 m

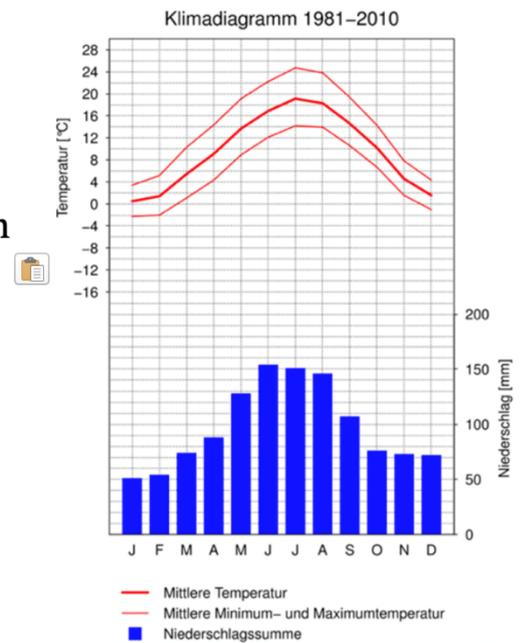


Abbildung 2). Das gesamte Versuchsgelände ist süd-östlich ausgerichtet (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Für den Versuch wurde eine Fläche von 24 x 1.0 x 0.6 m ausgeschieden. Die Totalfläche von 14.4 m² umfasst 24 Kleindächer sowie einen Zugangskorridor von 20cm zu allen Versuchspartellen. Die Auswahl der Fläche für die Versuchsanordnung erfolgte nach den folgenden Kriterien: 1) Neigung (0 bis 2 Grad), 2) sonniger Standort 3) Homogenität in Bezug auf Sonneneinstrahlung, Wind und Neigung.

2.2 ANFORDERUNGEN AN DEN AUFBAU VON VEGETATIONSFLÄCHEN

Die Anforderungen an Gründächer stehen im Spannungsfeld zwischen bautechnischen Erfordernissen an Bauwerk und Baustoffe sowie den ökologischen und klimatischen Gegebenheiten. Deshalb wurden in den letzten Jahrzehnten in Europa mehrere Dokumente zur Regelung der Planung, des Baus und der Instandhaltung von Dachbegrünungen herausgegeben.

Insbesondere die aktuellen deutschen Richtlinien „Dachbegrünungsrichtlinien – Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen“ (FLL, 2018), wurden aufgrund ihrer Ausführlichkeit und der bewährten Bau- und Landschaftstradition weltweit als Referenzgrundlage für die Planung und Regelung von Gründächern übernommen. Seit 1981 werden Forschungserkenntnisse und Normierungsaktualisierungen von allen betreffenden Fachbereichen (Sicherheit, Landschaftsbau, Freiraum, etc.) in den Richtlinien zusammengetragen.

Das FLL-Regelwerk wird daher auch als Grundlage für die Planung und Auswertung dieser Arbeit verwendet. Die Kennwerte für bodenphysikalische Grössen und die Anteile an pflanzenverfügbaren Nährelementen sind im Anhang 1 einzusehen.

2.3 SUBSTRATKOMPONENTEN

Ein Dachgartensubstrat besteht aus einem mineralischen Gesteinsgerüst und einem organischen Feinanteil. Die Berechnung der prozentualen Massenanteilen erfolgten auf den Richtwerten für Vegetationsschichten zur Dachbegrünung ("VDLUFA A 13.0", 1991). Hier wird für einen einschichtigen, extensiven Nährboden ein mineralischer Volumenanteil von 70 bis 90% empfohlen. Somit ist für alle getesteten Substrate das Mineralgerüst auf 75% und der organische Feinanteil auf 25% festgelegt worden. In der Abbildung 4 ist die Textur aller verwendeten Fein- und mineralischen Substratkomponenten ersichtlich. Eine detailliertere Angabe zu der Zusammensetzung der einzelnen Stoffe ist im Anhang 2 ersichtlich.



Abbildung 4. Verwendete Substratkomponenten (von links nach rechts): Schwarzerde (Swiss Terra Preta) mit 30% aktiviertem Biokohleanteil, Baumgrubensubstrat mit 90% aktiviertem Biokohleanteil, reine, unbehandelte Biokohle, Landerde, Rindenkompost, Feldsteine (Foto: C. Winter, 2021)

2.3.1 Feinanteile

Für die organischen Feinanteile wurde ein Gemisch aus ungeladener Biokohle (BK^-), Schwarzerde (Swiss Terra Preta) und ein Baumgrubensubstrat mit geladener und aktivierter BK (BK^+), Rindenkompost und Landerde verwendet (siehe Anhang 2). Es wurden drei unterschiedliche Ausgangssubstrate gemischt. Die genaue Zusammensetzung ist der Tab. 1 zu entnehmen. Während sich der Feinanteil der Varianten mit ungeladener Pflanzenkohle aus reiner Biokohle von Verora

(<https://www.verora.ch>) und Rindenkompost von der RICOTER AG (<https://www.ricoter.ch>) zusammensetzt, wurde für die Varianten mit geladener Biokohle ein Gemisch aus Schwarzerde mit einem aktivierten Biokohleanteil von 30% und Baumgrubensubstrat mit einem geladenen Biokohleanteil von 90% der Firma Bionika AG gemischt (<http://www.bionika.ch>). Der BK-Anteil aller Testvarianten liegt somit bei 15%, während die Kontrollvarianten keine BK (BK_n) enthalten. Die im Baumgrubensubstrat und in der Schwarzerde enthaltene Biokohle wird zum Massenanteil der aktivierten BK verrechnet.

(Co-kompostierten) Biokohle

Die Biokohle wurde extern durch die Firma Verora in einer Pyrolyseanlage (PYREG, Deutschland) hergestellt. Die Biomasse wurde dazu in einen 500 bis 700 Grad heißen Doppelschnecken-Reaktor (Abbildung 5) eingebracht und unter Luftausschluss erhitzt. Durch den Zusatz von Kompost und Viehmist wurde die BK mit Nährstoffen aufgeladen, was die Nährstoffverfügbarkeit des Substrates und gleichzeitig die Kationenaustauschkapazität fixierter Mineralien erhöht.

Die Aktivierung und Aufladung der Biokohle durch sorgfältiges Kompostieren und Beifügen von Mikroorganismen wurde durch die Firma Bionika (<http://www.bionika.ch>) durchgeführt.

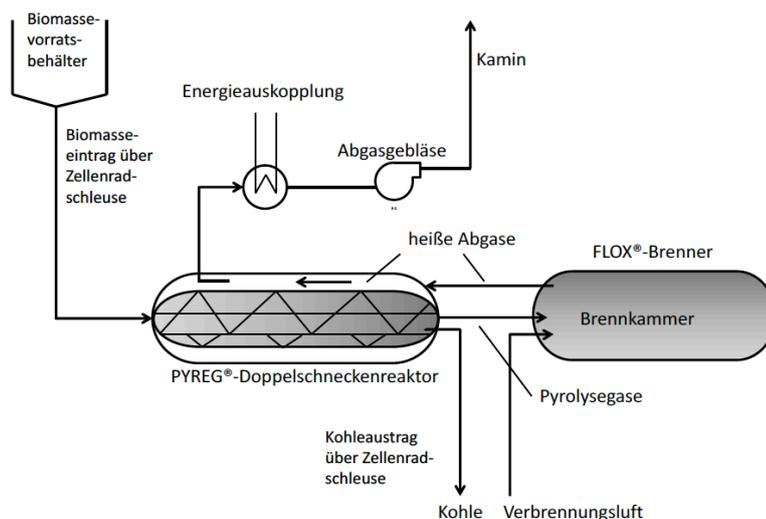


Abbildung 5. Schematische Prozessdarstellung nach Pyreg (2014) der Doppelschnecken- Pyrolyseanlage (Grafik: Radloff, 2016)

2.3.2 Mineralisches Gerüst aus Feldstein

Ein mineralisches Gerüst aus gebrochenen Feldsteinen (75%), welches wiederum mit 20% Landerde angereichert ist, wurde für alle 24 Kleindächer gewählt. Mit dem Mineralgerüst als Nebenprodukt der Zuckerrübenenernte soll der Anspruch nach Lokalität und Nachhaltigkeit berücksichtigt werden. Da die Verbringung mitangelieferter Feldsteine für die Zuckerindustrie immer schwieriger wird, werden neue Nutzungsmöglichkeiten geprüft. Die Firma RICOTER AG hat sich dazu entschieden, das Beiproduct der Zuckerindustrie weiter zu verarbeiten, um es als strukturgebende Komponente in Substraten zu

verwenden. Das ökologische Potenzial bei der Nutzung des lokalen Gesteinsgut liegt zudem in der Förderung von dachbasierten Mikrohabitaten für Bodenlebewesen und Wirbellose. Ausserdem soll mit dem Dachaufbau bestehend aus dem groben Material das fehlende Vorhandensein von tiefen Bodenschichten kompensiert werden, welches normalerweise als Rückzugsmöglichkeit und Wasserspeicher dient.

2.3.3 Schafswolle als organischen Düngezusatz

Alle Test- und Kontrollvarianten wurden mit Schafswolle (Einbaustärke: 3cm) angereichert. Die Wolle stammt von dem Spycher Handwerk (<https://www.spycher-handwerk.ch>), wo auch die Handwäsche mit professioneller Anleitung durchgeführt wurde. Für die Materialbestellung wurde mit einem Auflockerungsfaktor von 1.6 gerechnet. Die gewaschene Wolle wurde zusätzlich mit einem Faktor von 1.3 bestellt, da ein Drittel des Gesamtgewichts durch den Waschprozess verloren geht.

Vorbehandlung

Für den Versuch wurde ungewaschene Wolle (SW⁻), gewaschener Wolle (SW⁺) gegenübergestellt. Der Waschprozess wurde von Hand durchgeführt, da dies eine kontrollierter Ionenanalyse des Abwaschwassers erlaubt. Der Waschprozesses erfolgte in drei Schritten und ausschliesslich mit warmem Wasser und ohne Beigabe von Chemikalien oder Seife. Nach jedem Waschvorgang wurde die Wolle im Tumbler geschleudert. Im Anhang 3 sind Bilder des Waschvorgangs ersichtlich.

Litter Bag Experiment

Der Einfluss des Waschprozesse wurde zudem in Bezug auf die Zersetzungsrate untersucht und anhand eines Litter Bag Experiments analysiert

Schichtung

Ausserdem soll mit dem Versuch untersucht werden, ob die Schichtung der Wolle (Einbaulokalität mittig = SW^m, Einbaulokalität unten = SW^u), das Mobilisierungspotenzial der Mineralien beeinflusst.

2.4 SCHICHTAUFBAU DER EXPERIMENTELLEN KLEINDÄCHER

In der Regel besteht der Aufbau von Vegetationsflächen aus mehreren, unterschiedlichen Funktionsschichten, die in ihrer Wirkungsweise aufeinander abgestimmt sind. In Abhängigkeit von ihrer stofflichen Ausbildung können hingegen im Einschichtaufbau einzelne Schichten mehrere Funktionen, wie bspw. Drän- und Filterfunktionen, gleichzeitig übernehmen (FLL, 2018). Beim Einsatz von einschichtigen Dachbegrünungen können somit die Gesamtkosten, gegenüber dem Nutzen von mehrschichtigen Konstruktionen, deutlich gesenkt werden und damit einen der wichtigsten limitierenden Faktoren für die Verbreitung der Dachbegrünungstechnologie abbauen (Catalano et al., 2018). Für die vorliegende Arbeit wurde daher ein Einschichtaufbau gewählt.

Die Versuchsbehälter (0.6 m x 0.8 m) haben ein Gesamtvolumen von 30L (Abbildung 6). Die Aufbaudicke von 10 cm orientiert sich an der Minstdicke der durchwurzelbaren Vegetationstrageschicht für einschichtige Sedum-Kraut-Gras Begrünungen (FLL, 2018). Ein Feinanteilvolumen von 30 L x 0.25 L wurde für jede Variante im richtigen Verhältnis gemischt. Die Schwarzerde und das Baumgrubensubstrat der V1, V2, V5 und V6 mit jeweils drei Replikaten wurde von Bionika aufgeladen und biologisch aktiviert. Die Feinanteile aller anderen Varianten und Kontrollen wurden vor Ort gemischt.

Das mineralische Gerüst aus gebrochenen Feldsteinen wurde zu jeweils 75% auf alle Replikate gleichmässig verteilt. Für die Materialbestellung wurde beim Rundkies und den Feldsteinen mit einem Verdichtungsfaktor von 0.8 gerechnet, für die Feinanteilkomponenten Biokohle, Kompost und Schwarzerde mit einem Auflockerungsfaktor von 1.2.

Für eine Voruntersuchung wurden ausserdem drei separate Ausgangssubstrate (AS1 bis AS3) zu jeweils 30 Liter gemischt, deren Zusammensetzung in der Tab. 2 ersichtlich ist. Alle bodenphysikalischen Untersuchungen sowie Nährstoffanalysen wurden an diesen Ausgangssubstraten ohne Wolle (AS1_ Wn bis AS3_ Wn) durchgeführt (Tab. 2). Für die Analyse der Bodenparameter wurden diese zusätzlich im Messzylinder mit Wolle angereichert (AS_ Wy). Tab. 2 zeigt eine Übersicht über die Zusammensetzung aller Test-, Kontrollvarianten und Ausgangssubstrate.

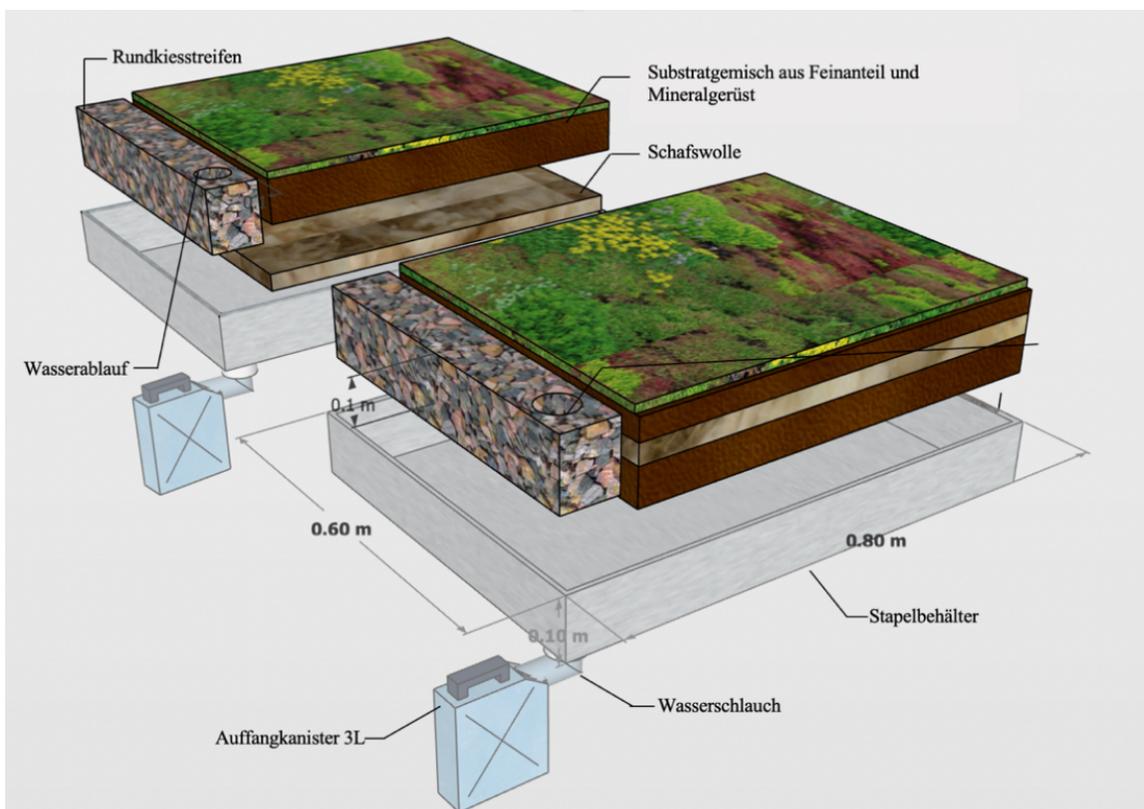


Abbildung 6. Schichtaufbau eines experimentellen Kleindachs. Links: Kleindach-Schichtaufbau mit SW im Unterbau (SW^u), rechts: SW in der Mitte (SW^m) eingebaut. Das Wasser durch die Neigung von 2 Grad wird über den Rundkies in die Auffangkanister geleitet, welches für die Sickerwasseranalysen genutzt wird (Grafik: C. Winter, 2021).

2.5 VERSUCHSAUFBAU

Tabelle 1. Dreifaktorieller Versuchsaufbau (Faktoren: SW-Schichtung, SW-Vorbehandlung und Biokohle) mit sieben Testvarianten und drei variierenden Kontrollen.

	SW ⁺			SW ⁻		
	BK ⁺	BK ⁻	BKn	BK ⁺	BK ⁻	BKn
SW ^m	V1	V3	C1	V5	V7	C3
SW ^u	V2	V4	C2	V6		

Der Versuch wurde gemäss der Feldplanung für dreifaktorielle Streifenanlagen aufgebaut (Munzert, 2015; Wilbois et al., 2004). Aus den Faktoren «SW-Schichtung» (2 Faktorenstufen), «SW-Vorbehandlung» (2 Faktorenstufen) und «Ausgangssubstrat» (3 Faktorenstufen) wurde ein Block mit sieben Varianten und einer Kontrolle ausgeschieden (Tab. 1), welcher jeweils dreimal wiederholt wurde.

1. Wh	V1	V5	V3	V7	C1	V2	V6	V4
	1	15	7	21	13	4	18	10
2. Wh	V7	V6	V2	V1	V5	V3	V4	C2
	22	19	5	2	16	8	11	14
3. Wh	V3	V4	C3	V2	V6	V7	V1	V5
	9	12	24	6	20	23	3	17

Abbildung 7. Schematische Darstellung der Versuchsanordnung im Feld. Streifenanlage bestehend aus drei Blockwiederholungen. Innerhalb eines Blocks wurden die Parzellen randomisiert.

Die Anordnung innerhalb des Blocks wurde randomisiert (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die Blöcke wurden süd-östlich ausgerichtet (Abbildung 8).



Abbildung 8. Die Drohnenaufnahme zeigt den Aufbau der Streifenanlage mit drei Blockwiederholungen zu jeweils 8 Parzellen im Privatgarten, Meggen. Die Ausrichtung der Anlage ist nach Südosten und homogen in Bezug auf Sonneneinstrahlung, Neigung und Windeinwirkung (Foto: N. Winter, 2021)

Tabelle 2. Übersicht über die Zusammensetzung aller Testvarianten (V1 bis V7) und Kontrollen (C1 bis C3) sowie Ausgangssubstrate ohne Wolle (AS1_Wn bis AS3_Wn) und Ausgangssubstrate mit Wolle (AS1_Wy bis AS3_Wy) für die Voruntersuchungen. Das mineralische Gerüst (75%) aller Kontroll- und Testvarianten besteht aus Feldsteinen (80%) und Landerde (20%). Die drei Faktoren werden folgendermassen abgekürzt: gewaschene Wolle (SW⁺), ungewaschene Wolle (SW⁻), mittlere Einbaulokalität von SW (SW^m), SW- Einbau unten (SW^u), geladene und aktivierte BK (BK⁺), ungeladene BK (BK⁻).

Variante	Faktoren			Feinanteikomponenten (25%)			
	Behandlung	Aufbau	BK Ladung	Zusammensetzung	Anteil (%)	BK-Anteil Total (%)	Replikate
V1	SW ⁺	SW ^m	BK ⁺	Baumgrubenssubstrat mit 90% BK	12.5	15	3
				Schwarzerde mit 30% BK	12.5		
V2	SW ⁺	SW ^u	BK ⁺	Baumgrubenssubstrat mit 90% BK	12.5	15	3
				Schwarzerde mit 30% BK	12.5		
V3	SW ⁺	SW ^m	BK ⁻	Biokohle Verora	15	15	3
				Landerde	10		
V4	SW ⁺	SW ^u	BK ⁻	Biokohle Verora	15	15	3
				Landerde	10		
C1	SW ⁺	SW ^m	-	Rindenkompost	15	0	1
				Landerde	10		
C2	SW ⁺	SW ^u	-	Rindenkompost	15	0	1
				Landerde	10		
V5	SW ⁻	SW ^m	BK ⁺	Baumgrubenssubstrat mit 90% BK	12.5	15	3
				Schwarzerde mit 30% BK	12.5		
V6	SW ⁻	SW ^u	BK ⁺	Baumgrubenssubstrat mit 90% BK	12.5	15	3
				Schwarzerde mit 30% BK	12.5		
V7	SW ⁻	SW ^m	BK ⁻	Biokohle Verora	15	15	3
				Landerde	10		
C3	SW ⁻	SW ^m	-	Rindenkompost	15	0	1
				Landerde	10		
AS1_Wn	-	-	BK ⁺	Baumgrubenssubstrat mit 90% BK	12.5	15	1
				Schwarzerde mit 30% BK	12.5		
AS2_Wn	-	-	BK ⁻	Biokohle Verora	15	15	1
				Landerde	10		
AS3_Wn	-	-	-	Rindenkompost	15	0	1
				Landerde	10		
AS1_Wy	SW ⁺	SW ^m	BK ⁺	Baumgrubenssubstrat mit 90% BK	12.5	15	1
				Schwarzerde mit 30% BK	12.5		
AS2_Wy	SW ⁺	SW ^m	BK ⁻	Biokohle Verora	15	15	1
				Landerde	10		
AS3_Wy	SW ⁺	SW ^m	-	Rindenkompost	15	0	1
				Landerde	10		

2.6 EXTENSIVE BEPFLANZUNG

Je nach Nutzung und bautechnischen Gegebenheiten, erfolgen bei der Pflanzenauswahl und dem Vegetationsaspekt unterschiedliche Vorgehensweisen. Der Fokus dieser Arbeit richtet sich nach der Etablierung einer extensiven Begrünung. Diese beinhaltet eine naturnah gestaltete Vegetationsform, die sich weitgehend selbst erhaltet und weiterentwickelt (FLL, 2018). Dabei wird auf eine lokale und robuste Pflanzenauswahl mit hoher Anpassung an spezielle Standorte gesetzt. Extensivbegrünungen tauschen spontane Selbstbegrünungen ab und bilden einen dauerhaften Bestand, ohne dass grosse Pflegemassnahmen notwendig werden. Diese Bedingungen schränken die verfügbare Pflanzenpalette für extensive Dachbegrünungen auf trockenheitstolerante, windtolerante und niedrigwüchsige, typischerweise langsam wachsende Pflanzen ein (Buffam & Mitchell, 2015; Thuring & Grant, 2016).

Häufig handelt es sich deshalb um geschlossene Bestände aus Moose, Sukkulente, Kräuter und Gräser. Sedum-Arten werden am häufigsten verwendet, da sie fakultative CAM-Arten sind. Das heisst, sie konservieren Wasser während Trockenperioden durch einen internen CO₂-Kreislauf, können aber ihren Photosyntheseweg als Reaktion auf eine erhöhte Wassermenge auf C3 umstellen (Aitkenhead-Peterson et al., 2011). Sie sind somit ideale Stresstrategen, welche an eine variable Wasserverfügbarkeit angepasst sind.

Bei dem Saatgut handelt es sich deshalb um eine Auswahl an krautigen, einheimischen Pflanzen und *Sedum rupestre*. Die Pflanzenliste beruht auf der Berechnung der durchschnittlichen Ökologischen Zeigerwerte von Landolt (Landolt et al., 2010) über alle erfolgreich angesiedelten Pflanzen aus der Vorstudie «Gründächer mit Biokohle», welche durch Innosuisse gefördert wurde. Für einen langfristigen Begrünungserfolg sollen ausserdem vermehrt Hemikryptophyten (langjährige) Taxa mit kompetitiven intermediären Lebensformen sowie die stresstolerante *Sedum* Art gefördert werden. Eine Übersicht der Pflanzenwahl, mit den dazugehörigen Ökologischen Zeigerwerten, Lebensformen und Konkurrenzstrategien nach Landolt (Landolt et al., 2010) ist in der Tab. 3 zu sehen. Die Samen wurden von der Wildstaudengärtnerei Patricia Willi (<https://www.wildstauden.ch>) bestellt. Die *Sedum rupestre* Sprossen stammen von Future Planter (<https://futureplanter.ch>).

Mittels Präzessionswaage (XSR204, Mettler Toledo, Schweiz) wurden gleichwertige Samenmischungen aus Samen (3g/m²) und *Sedum rupestre* (68g/m²) erstellt. Die Ansaat wurde am 24. März 2021, ohne Bewässerung und Düngung vorgenommen. Die Anreicherung mit Sand erlaubte die Sicherstellung einer homogenen Verteilung.

Tabelle 3. Lebensformen (LF), Landolts Ökologische Zeigerwerte (EIVs) und Konkurrenzstrategien (KS) der Arten, die im März 2021 auf den Kleindächern eingeführt wurden. Landolts EIVs (Ökologische Zeigerwerte) für T = Temperaturzahl, K = Kontinentalitätszahl; R = Reaktionszahl; N = Nährstoffzahl (Landolt et al., 2010).

Taxon	T	K	L	F	R	N	LF	KS
<i>Bromus erectus</i>	4.00	4.00	4.00	2.00	4.00	2.00	h	ccs
<i>Dianthus carthusianorum</i>	4.50	4.00	4.00	1.50	4.00	2.00	h	crs
<i>Lotus corniculatus</i>	3.00	3.00	4.00	2.50	3.00	3.00	h	crs
<i>Papaver rhoeas</i>	4.00	4.00	4.00	2.00	4.00	3.00	t	rrr
<i>Salvia pratensis</i>	3.50	4.00	4.00	2.00	4.00	2.00	h	crs
<i>Sanguisorba minor</i>	3.50	3.00	4.00	2.00	4.00	2.00	h	css
<i>Sedum rupestre</i>	4.50	4.00	4.00	1.50	3.00	2.00	c	sss
<i>Silene vulgaris</i>	3.00	4.00	4.00	2.50	3.00	2.00	h	crs
Mittelwert EIV's	3.75	3.75	4.00	2.00	3.63	2.25		

EIVs: T: 3.5 = unter-montan und ober-kollin, 4 = kollin; K: 3 = subozeanisch bis subkontinental, 4 = subkontinental; L: 4 = hell, F: 2 = mässig trocken, R: 3 = schwach sauer bis neutral (pH 4.5-7.5), 4 = neutral bis basisch (pH 5.5-8.5); N: 2 = nährstoffarm, 3 = mässig nährstoffarm bis mässig nährstoffreich; LF: c = krautiger Chamephyt, h = Hemikryptophyt (langjährige), t = Therophyt. (einjährige); KS: r = Ruderalstrategie, s = Stresstrategie, c = Kompetitive Strategie.

2.7 UNTERSUCHUNGSGRÖSSEN UND PROBENAHEME

Die Erfolgskontrolle umfasste eine regelmässige Analyse von Sickerwasserproben, pflanzenverfügbaren Nährstoffen, der totalen Nährstoffkonzentrationen im Substrat, Bodenstrukturparameter sowie Vegetationsaufnahmen. Zusätzlich wurde die Vorbehandlung der Wolle als organische Substratkomponente sowie deren Zerfallsstruktur genauer analysiert.

Die gewählten Methoden orientierten sich an den vorgegebenen Referenzmethoden der FLL-Richtlinien. Dazu dient das VDLUFA-Methodenbuch des Verbandes Deutscher Landwirtschaft (1991). Weiter stützt sich die Untersuchung durch die limitierten Möglichkeiten des ZHAW Labors, auf die Schweizerischen Referenzmethoden der Eidg. landwirtschaftlichen Forschungsanstalten der Agroscope (1996).

Eine Referenzmethode für die Probenahme im Feld für einschichtige Substrate mit organischem Layer ist nicht vorhanden. Es wurde folgendes Vorgehen gewählt:

Von jeder Variante wurden insgesamt 10kg Störproben entnommen. Abhängig vom Faktor Aufbau, wurde dazu von den oberen und unteren Horizonten gleichmässig viel Substratmaterial entnommen, die organische Mittel- oder Unterschicht wurde dazu von Hand abgetrennt. Die separate Wollschicht wurde im Labor erneut gewaschen und der Feinanteil, welcher in der Wolle anhaftete, mithilfe von einem Sieb (Maschengrösse 2mm) aufgefangen. Das Wasser und das kleinste Feinstmaterial ($<45\mu\text{m}$) wurde über ein kleineres Sieb (Maschengrösse $45\mu\text{m}$) abgelassen (Abbildung 8, links). Die aufgefangene Kleinstfraktion ($>45\mu\text{m}$) wurde zu den Störproben zurückgeführt.

Für die Nährstoffanalysen wurde das Probematerial ohne organische Schicht zu einem späteren Zeitpunkt getrocknet und gemahlen. Für alle bodenphysikalischen Untersuchungen wurde dasselbe Material mittels Proctorhammer (4,5 kg Fallgewicht, Fallhöhe 450 mm) in einem Metallzylinder (\varnothing 56mm) verdichtet. Diese bilden die Wn- Proben (ohne Wolle).

Zusätzlich wurde die reine, organische Schicht von jeder Variante im Trockenschrank bei 40 Grad getrocknet. Für die Wy-Proben (mit Wolle) wurde die Wolle zu jeweils 5g im mittleren Teil des Zylinders zusammen mit der Störprobe mittels Proctorhammer verdichtet (Abbildung 8, rechts)



Abbildung 9. Methodisches Vorgehen für die Analyse der Dachsubstrate mit organischer Schicht. Links: Nicht degradierte Schafswolle wurde aus dem Substratproben abgetrennt und im Labor mittels Siebs vom Feinanteil getrennt. Rechts: Laborverdichtete Substratproben, wobei die links die Wolle mittig eingeführt wurde (Fotos: C. Winter, 2021).

2.7.1 Sickerwasserproben

Der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit (EC) im Sickerwasser der 24 Kleindächer wurde mittels Multisonde (HQd Field Case, Hach, Deutschland) im zweiwöchentlichen Abstand, insgesamt achtmal gemessen. Die Anionen Natrium (Na^+), Ammonium (NH_4^+), Potassium (K^+) und Magnesium (Mg^{2+}) sowie die Kationen Chlorid (Cl^-), Nitrit (NO_2^-), Nitrat (NO_3^-), Phosphor (PO_4^{3-}) und Sulfat (SO_4^{2-}) im Sickerwasser wurden im monatlichen Abstand und insgesamt viermal mittels Ionenchromatographen (930 Compact IC Flex, Methrom, Deutschland) bestimmt.

Um den Nährstoffgehalt im austretenden Sickerwasser bei der Wollwäsche zu bestimmen, wurde bei allen Waschdurchgängen (1., 2., und 3. Waschgang) eine Dreifachprobe mittels des Ionenchromatographen analysiert.

2.7.2 Bodenstrukturparameter

Alle Bodenstrukturparameter wurden von den drei Ausgangssubstraten (AS1 bis AS3) sowie von den sieben Testvarianten (V1 bis V7) und den drei Kontrollen (C1 bis C3) im verdichteten Zustand bestimmt. Die maximale Wasserkapazität (WKmax), das Gesamtporenvolumen (GPV), die Rohdichte im trockenen Zustand und bei WKmax (ρ_t und ρ_{WKmax}) und die Luftkapazität (LK) wurden zusätzlich von allen Proben einmal ohne (Wn) und einmal mit Beigabe von Wolle analysiert (Wy). Für die Beigabe von Wolle bei AS1_Wy bis AS3_Wy wurde jeweils 5g nicht zersetzte Wolle (SW^+) mittig (SW^m) im Metallzylinder eingebaut. Für die Testvarianten V und Kontrollvarianten C wurde bereits zersetzte Wolle beigefügt (vgl. Kapitel 2.4.3 Untersuchungsgrößen und Probenahme).

Wasserhaushalt

Für die WKmax wurde die Fraktion <5mm von Hand ausgesiebt und mit dem Proctor Hammer verdichtet. Mittels der schweizerischen Referenzmethoden der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten ("B-WHK", 1996) wurde die WHK des verdichteten Zylinder bestimmt. Dazu wurden die Substratproben während 8h aufgesättigt und im Sandbad während 4h entwässert. Die Auswägung der Gewichte erfolgte mit einer Präzisionswaage (ML4002T/00, Mettler Toledo, Schweiz). Die Berechnung der WKmax erfolgte nach den Vorgaben des FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e. V. (FLL), 2018a). Die Volumengewichte (ρ_t und ρ_{WKmax}) wurden aus der WKmax der verdichteten Zylinder berechnet (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e. V. (FLL), 2018b).

Lufthaushalt

Das Gesamtporenvolumen (GPV) und der Volumenanteil an luftführenden Poren, der sich bei Feldkapazität, also bei einer Saugspannung von 63 hPa (= pF 1,8) einstellt, wurde mittels Drucktopfs bestimmt. Dazu wurden Keramikplatten im Drucktopf mittels Wassersäule von 170cm entgast.

Die Saugspannungskraft (pF - Werte = 1.8) wurde mit einer Wassersäule von 60 cm erreicht (Fachstelle Bodenökologie, 2013). Die Berechnung der Porenanteile der gesamten Korngrössefraktion erfolgte in einem verdichteten Zylinder (\varnothing 57mm). Aufgrund des geringen Zylinderdurchmessers bei gleichzeitig grossen Korndurchmessern wiesen die Resultate eine unverhältnismässig grosse Standardabweichung (\pm 22%) auf, weshalb diese Methode verworfen wurde und nur die Fraktion <5 mm dazu verwendet wurde. Die Porenvolumen sind daher unterschätzt und können nur in Bezug auf einen internen Vergleich der Varianten berücksichtigt werden.

Die Berechnung der Luftkapazität bei WK_{max} ($LK_{WK_{max}}$) und nach der Entwässerung mit einer Saugspannung von $pF = 1.8$ ($LK_{pF1.8}$) erfolgte aus der Differenz zwischen dem Gesamtporenvolumen, respektive dem Grobporenvolumen bei $pF 1.8$ ($PV_{pF 1.8}$) und dem Wassergehalt bei Wk_{max} (vgl. FLL, 2018). Die Wasserdurchlässigkeit (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e. V. (FLL), 2018c) konnte aufgrund fehlender Messgeräte nicht gemessen werden.

Bodentextur

Für die Bodentexturanalyse wurde eine Trockensiebung (Siebgrössen: 0.045mm, 0.063mm, 0.125mm, 0.25mm, 0.5mm, 2mm, 4mm, 10mm, 16mm und 20mm) durchgeführt. Für die Partikelgrössen ≤ 5 mm wurde die Fraktion während 10min von der Analysensiebmaschine (AS 200, Retsch, Deutschland) gesiebt. Die Fraktion >5 mm wurde von Hand ausgesiebt. Die Analyse der Korngrössenverteilung erfolgte mit allen Ausgangssubstraten, Varianten und Kontrollen sowie den Feldsteinen. Die Referenzmethode ("VDLUFA C 2.0", 2002) wurde an die Möglichkeiten der zur Verfügung stehenden Laborgeräte der ZHAW adaptiert.

2.7.1 Nährstoffanalysen

Für die Nährstoffanalysen wurden die drei Ausgangssubstrate (AS1 bis AS3) sowie die sieben Testvarianten (V1 bis V7) und die drei Kontrollen (C1 bis C3) ohne Zusatz von Wolle im Trockenschrank (2.0, Binder, Deutschland) während 24 Stunden bei 105 Grad getrocknet. Anschliessend wurde das Material gesiebt (Maschenweite 5mm) und mit der Kugelmühle (MM400, Retsch, Deutschland) gemahlen. Für eine umfassende Analyse der Substrate und eine Aussage über die Adsorptionsfähigkeit der Biokohle wurden die pflanzenverfügbaren, löslichen mineralischen Nährstoffe sowie die Reservenährstoffe bestimmt. Zusätzlich erlaubte der Vergleich mit den Daten aus der Vorstudie, den Düngeeffekt der Schafswolle zu prüfen, da die Voruntersuchung Testvarianten ohne Schafswolle beinhaltete.

Pflanzenverfügbare Nährstoffe

Die Analyse der Düngeszustände von Böden basiert in der Schweiz auf unterschiedlichen Methoden. Die bekanntesten sind etwa die Extraktion mit reinem Wasser (H_2O_{10}) oder mit Ammoniumacetat-EDTA (AAE_{10}) (Stünzi, 2004). H_2O wird als milde Extraktionslösung verwendet, um die Versorgung des

Bodens mit leicht löslichen, den Pflanzen unmittelbar zur Verfügung stehenden Nährelementen zu analysieren und die Aktivität der Nährstoffionen in der Bodenlösung zu untersuchen. Durch EDTA als aggressives Extraktionsmittel hingegen werden Reserveelemente extrahiert, welche potenziell von den Pflanzen genutzt werden können, da sie im Boden irgendwann in Lösung gehen und somit pflanzenverfügbar werden (Flisch et al., 2017a).

Die Methoden zur Analyse der pflanzenverfügbaren Spurennährstoffe weicht zwar von der im FLL beschriebenen CAT-Methoden ab. Die verwendete EDTA-Extrakt-Methode behält laut VDLUFA Methodenhandbuch dennoch ihre Gültigkeit ("VDLUFA A 13.1.1", 2004). Das Resultat kann laut dem vom Bundesamt verabschiedeten Dokument über die Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD) durch die Berechnung eines Gesamtkorrekturfaktors aus einem gewichteten Mittelwert (2x AAE10 und 1x H2O10) noch besser an die tatsächliche Verfügbarkeit für Pflanzen angeglichen werden (Kuster et al., 2017).

Die leicht löslichen, pflanzenverfügbaren Nährelemente Mg, P und K wurden also durch eine Gewichtung der H2O10 Volumenextraktions – Methode ("H2O10-Ex", 1996) und 1:10 Ammoniumacetat + EDTA ("AAE10-Ex:", 1996) ermittelt. Für die Umsetzung der beiden Untersuchungen wurde der ICP-OES Analyser (ICP-OES 5800, Agilent, USA) verwendet. Die erhaltenen Resultate konnten direkt mit den FLL - Richtwerten abgeglichen werden. Für die Bestimmung des pflanzenverfügbaren Stickstoffgehaltes wurde der NO₃ mittels LCK 339 Lange Test (Hach, DR600, Schweiz) analysiert. Wegen der leichten Flüchtigkeit von Ammonium, ist der NH₄ im Gesamtstickstoff nicht berücksichtigt. Aufgrund dessen können die Daten nicht direkt mit den FLL-Anforderungen abgeglichen werden. Ein Vergleich zwischen den Varianten wird aber einbezogen.

Gesamtgehalte

Die Bestimmung der mineralischen Totalgehalte Mg, K₂O und P₂O₂ wurden im Königswasseraufschluss bestimmt ("VDLUFA A 2.4.3.1", 1991). Hierzu wurde das Mikrowellenaufschlussgerät Discover-SD (CEM, Deutschland) verwendet. Die Totalgehalte von Stickstoff und Kohlenstoff wurden mittels CHN-Analyser (TruSpec Macro Analyser, LECO, USA) extrahiert und zum Schluss auf die Gesamtfraction hochgerechnet.

Reservenährstoffe

Anfangs 2004 wurde die AAE10 als alleinige offizielle Methode für die Überprüfung der Nährstoffgehalte der Böden im Rahmen des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN Schweiz) festgelegt. Im Sinne einer Vereinfachung wurde beantragt, diese Methode auch für die Düngerbemessung aller Kulturen zu verwenden (Stünzi, 2004). Das hoch konzentrierte Extraktionsmittel EDTA enthält Komponenten mit stark komplexierender Wirkung ("VDLUFA A

7.6.1", 1997). Es erfasst deshalb nebst der unmittelbar löslichen Fraktion der Nährelemente auch die Teile des langsam nachlieferbaren Vorrats.

Corg und organische Substanz

Der organische Kohlenstoff (Corg) wurde mittels CHN-Analyzer (TruSpec Macro Analyser, LECO, USA) extrahiert und zum Schluss auf die Gesamtfraktion hochgerechnet. Der Gehalt an organischer Substanz wurde aus dem Corg mit einem Multiplikator von 1.72 berechnet ("VDLUFA A 4.1.3.1", 2016).

Salzgehalt und pH-Wert

Für die Bestimmung des Salzgehaltes und des pH-Wertes des Substrates wurden die Proben im 1:1.5 H₂O Volumenextrakt Verfahren vorbereitet ("H2O10-Ex", 1996). Die Probe wurde dazu mit dem Rotationsschüttler (RO 500, Gerhardt, Deutschland) vermischt. Die Werte wurden mit der Multisonde (HQd Field Case, Hach, Deutschland) im Volumenextrakt ermittelt ("H2OSU-PH", 1996; "H2OSU-Sal", 1996). Für die Umrechnung des Salzgehaltes in die Einheit [g/L] aus der elektrischen Leitfähigkeit [μ S/cm] wurde die Methode "VDLUFA A 10.1.1" (1991) verwendet.

2.7.2 Vegetationsaufnahmen

Um den Vegetationserfolg insgesamt, aber auch um anhand der ökologischen Ansprüche angesiedelter Pflanzenarten Erkenntnisse über die Standorteigenschaften der Kleindächer zu erhalten, wurde eine Vegetationsaufnahme durchgeführt. Eine Abschätzung der absoluten Bedeckung (%), die Erstellung der Pflanzenliste sowie der Bedeckungsgrad aller Pflanzenarten (%) von jedem Kleindach (0.42m²) wurde am 20. Juni 2021 nach Braun-Blanquet (1964) durchgeführt. Die taxonomische Einteilung der Arten basierte auf der nomenklatorischen Referenzliste nach Infoflora (Juillerat et al., 2017).

Anhand der ökologischen Zeigerwerte der beobachteten Pflanzenarten nach Landolt et al. (2010), welche die Standortansprüche alle Arten indizieren, konnten weitere Schlüsse im Hinblick auf die ökologischen Eigenschaften der Testsubstrate als Wachstumsmedien gemacht werden.

Die Pflanzenarten wurden dazu in drei Gruppen eingeteilt: 1) spontane Arten (Arten, welche nicht in der Samenmischung vorhanden waren), 2) etablierte Arten (Arten der ersten Gruppe, die im Juni 2021 gefunden wurden), 3) nicht etablierte Arten der ersten Gruppe, die im Juni 2021 nicht gefunden wurden. Auf der Basis der Datenbank Flora Indicativa (FI) der Schweizer Flora nach Landolt et al. (2010), wurden folgende Indikatoren berechnet:

- 1) die mittleren Ökologischen Zeigerwerte nach Landolt (EIVs) – für **Klimafaktoren:** Temperaturzahl (T), Kontinentalitätszahl (K) und Lichtzahl (L) – und **Bodenfaktoren:** Feuchtezahl (F), Reaktionszahl (R) und Nährstoffzahl (N)
- 2) die Lebensformen (LF).
- 3) die Konkurrenzstrategien (KS)

Da die Untersuchung nur innerhalb eines Vegetationszyklus stattgefunden hat, wurden Annahmen zur weiteren Vegetationsentwicklung aufgrund der Studie von Thommen (1986), welcher die Sukzessionsdynamik auf extensiven Gründächern analysiert hat, gemacht. Aufbauend auf der natürlichen Sukzessionstheorie (Braun-Blanquet 1972) hat der Autor Thommen (1986) verschiedene Artengruppen, welche unter ähnlichen Bedingungen gefunden wurden, zu wiederkehrenden, vorhersagbaren Gemeinschaften oder Assoziationen zusammengefasst und die wichtigsten Steuergrößen für die Sukzessionsprozesse zusammengefasst (Thuring & Grant, 2016). Um weitere Rückschlüsse auf die Standorteigenschaften der getesteten Substrate als Lebensraum zu generieren, wurde die Studie mit den empirischen Beobachtungen der vorliegenden Arbeit in Zusammenhang gebracht.

2.7.3 Litter Bag Experiment

Die Abbaurate der Wolle durch Mikroorganismen wurde in einem Litter Bag Experiment analysiert. Dazu wurde W^+ und W^- während 24h bei 40 Grad getrocknet. Diese wurde in teebeutelgrosse Säcke (10x10cm) mit einer Maschengröße (0.5mm) 10cm unter der Erde vergraben. Beutel mit W^+ und W^- wurden jeweils dreimal repliziert. Der Wollinhalt wurde vor dem Vergraben am 10. März und nach dem Ausgraben am 30. Mai (Zeitraum: 80d) mit der Präzisionswaage (XSR204, Mettler Toledo, Schweiz) gewägt. Der Massenverlust der Wolle über die Zeit kann als Zerfallsmodell dargestellt werden:

$$M_t = M_0 \cdot e^{-kt}$$

wobei M_t = Masse zur Zeit t, M_0 = Masse zur Zeit 0, t = Zeit in Tagen.

Die Auflösung nach k erlaubt eine Aussage über die Geschwindigkeit der Abbaurate SW^+ im Vergleich zu SW^- sowie eine Klassifizierung der Abbaurate, wobei «schnell» ($k > 0.01$), «mittel» ($k = 0.005 - 0.001$) und langsam ($k < 0.005$) bedeutet (Methode nach Bärlocher, 2005).

$$M_t = M_0 \cdot e^{-kt}$$

2.8 STATISTISCHE AUSWERTUNG

Für die statistische Auswertung diente die Statistik Software R-Studio (Version 1.3.1056). Da es sich bei der Streifenanlage um ein komplexes Modell mit mehreren Randomisierungsschritten (Block, Position) , respektive mehreren, zufälligen Effekten handelt (Piepho & Büchse, 2003) sowie eine über mehrere Zeitpunkte wiederholte Erfassung von Zielvariablen soll ein gemischtes Modell angewendet werden (D. Bates, 2011).

Elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert

Die Signifikanz der drei Faktoren (Biokohle, Schichtung und Behandlung) sowie die Substratvarianten selbst (V01 bis V7) auf die pH- und EC-Datensätze wurden in einem nonlinear mixed-effect model (R-package: nlme) mit einem Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ geprüft. Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Behandlungseffekten sollen somit erkannt werden (D. Bates, 2011). Wegen der wiederholten Messung muss bei der Analyse eine allfällige Korrelationen zwischen den gleichen Parzellen berücksichtigt werden (Piepho & Büchse, 2003). Dafür wurde zuerst der ACF-Autokorrelationskoeffizient (R-package: perARMA) ermittelt. Als zufälliger Effekt wurde die Position integriert.

Die Datensätze wurden teilweise mathemisch transformiert (log10 und sqrt), um eine bessere Modelldiagnostik zu erhalten. Modelle, welche durch die Transformation nicht verbessert werden konnten, wurden eliminiert. Eine Ausreisserbereinigung wurde aufgrund der bereits geringe Datenmenge nicht durchgeführt.

Ionenchromatographie

Die Analyse der Ionen erfolgte ebenfalls mit mehrfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung (R-package: nlme). Die Daten wurden teilweise mathematisch transformiert (log10 und sqrt). Nitrit konnte keine Verbesserung durch Transformation erzielen. Die Daten werden deshalb von allen statistischen Tests ausgeschlossen. <LOQ- Werte (Limit of Quantification) wurden mit der Substitutionsmethode (LOQ/sqrt(2)) (Ganser & Hewett, 2010), berechnet. Die Nachweisgrenze der jeweiligen Ionen ist im Anhang 4. ersichtlich. Messungen deren Wert 100 mg/L überschritten haben, gelten als unzuverlässig. Sie wurden jedoch nicht aus dem Datensatz eliminiert.

Vegetationsanalyse

Der Einfluss der Faktoren auf die Vegetationsbedeckung, wurde in einer linearen, multifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) mit einem Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ geprüft. Die Daten wurden teilweise log10-transformiert.

Alle statistischen Tests für pH-, EC und IC wurden jeweils mit den gesamten Datensätzen durchgeführt. Für die Post-hoc Analyse der ANOVA mit Messwiederholung und eine gezielte Beantwortung der Fragestellungen, wurden die Test-, Kontrollvarianten und Ausgangssubstrate in statistische Vergleichsgruppen unterteilt (Tab. 4). Die Varianten innerhalb einer statistischen Gruppe variieren jeweils nur in gerade einem Faktor, welcher für die jeweilige Teilfrage relevant ist. Die Datenmenge wird so zwar reduziert, es lässt sich jedoch so genau beschreiben, zwischen welchen Varianten die signifikanten Unterschiede auftreten.

Tabelle 4. Teilfragen mit dazugehörigen Vergleichsgruppen für die ANOVA mit Messwiederholung.

Teilfrage	Statistische Gruppe				Variable Faktoren	Konstante Faktoren
	Grp.1	Grp.2	Grp.3	Grp.4		
Tf 1	V1/V3/C1	V2/V4/C2	V5/V7/C3		Biokohle	Schichtung, Behandlung
Tf 2	V1/V5	V2/V6	V3/V7	C1/C3	Behandlung	Biokohle, Schichtung
Tf 3	V1/V2	V3/V4	V5/V6	C1/C2	Schichtung	Biokohle, Behandlung
Tf 4	V1,V2,V5,V6,AS1_Wn/ V1,V2,V5,V6, AS1_Wy	V3,V4,V7,AS2_Wn V3,V4,V7,AS2_Wy	C1,C2,C3,AS3_Wn C1,C2,C3,AS3_Wy		Probenahme (Wn/Wy)	Substratzusammensetzung

3 RESULTATE

Im folgenden Kapitel werden alle Resultate ausführlich beschrieben. Im Anhang 1 folgt zusätzlich eine tabellarische Übersicht aller Ergebnisse in einem direkten Vergleich zu den FLL-Kennwerten.

3.1 SUBSTRATANALYSEN

3.1.1 Bodenstrukturparameter

Luft- und Wasserhaushalt

Die maximale Wasserkapazität aller Test-, Kontrollvarianten und Ausgangssubstrate liegen im FLL – Anforderungsbereich (Abbildung 10). Dabei liegt die durchschnittliche WKmax der Wy-Samples (40.60 % ± sd 5.23) leicht über den Samples ohne Wolle (37.59 % ± sd 5.62). Die AS mit und ohne Wolle haben eine durchschnittlich höhere WKmax (45.6 % ± sd 1.8) als die Testvarianten (38.9 % ± sd 3.8) und Kontrollen (33.1 % ± sd 2.1). Die Betrachtung der WKmax auf Faktorenstufe zeigt, dass Varianten mit BK⁻ durchschnittlich die höchste WKmax (40.4 % ± sd 3.7) und Parzellen ohne BK die tiefste WKmax (35.1 % ± sd 4.2) aufweisen.

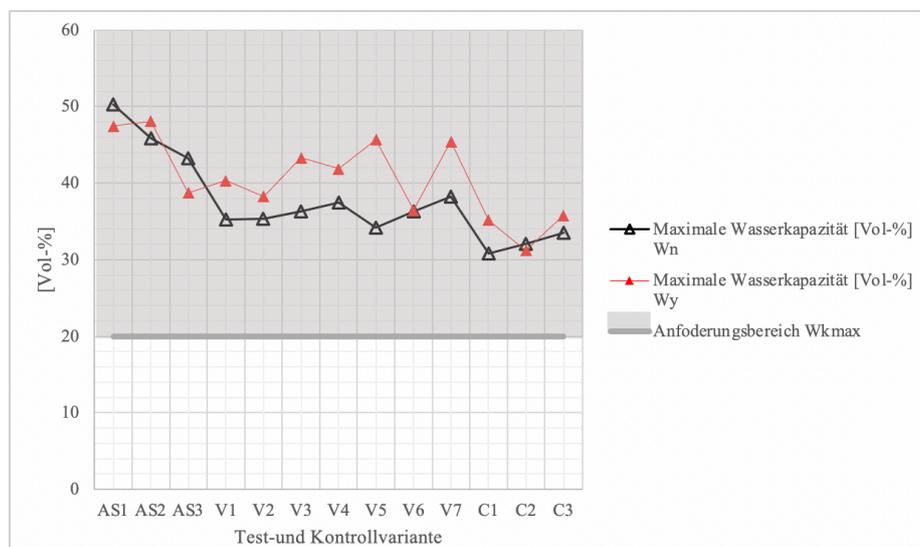


Abbildung 10. Wasserhaushalt: Maximale Wasserkapazität [Vol-%] von Bodensamples mit (Wy) und ohne Wolle (Wn) aus allen Ausgangssubstraten (AS), Testvarianten (V) und Kontrollen (C) sowie den FLL- Anforderungsbereich für die WKmax

Die für den Lufthaushalt relevante Kenngröße LK ist bei allen Samples mit Wolle gegenüber den Wn-Samples erhöht (Tab. 5).

Tabelle 5. Durchschnittliche Luftkapazität bei WKmax und bei pF 1.8

Sample	Wn-Samples		Wy-Samples	
	LK _{WKmax} [Vol-%]	LK _{pF 1.8} [Vol-%]	LK _{WKmax} [Vol-%]	LK _{pF 1.8} [Vol-%]
Total Ø	1.18	20.02	3.62	29.62
sd	4.01	2.23	2.34	4.89

Dabei entspricht die LK bei WKmax nicht dem geforderten Kennwert der FLL, was auf die reduzierte Kornfraktion zurückzuführen ist. Deshalb soll zusätzlich die LK bei pF 1.8 (LK_{pF 1.8}) erhoben werden (FLL, 2018). Diese liegt für alle Wy-Samples im Anforderungsbereich. Die Wn-Proben sind teilweise leicht unter dem Schwellenwert. (Abbildung 10, links). Der Vergleich auf Faktorenstufe zeigt wiederum, dass die durchschnittliche LK_{pF 1.8} bei allen Varianten mit BK⁺ (26.13 % ± sd 5.3) und BK⁻ (26.69 % ± 8.02) höher liegt als bei Varianten ohne BK (22.63 % ± sd 5.23)

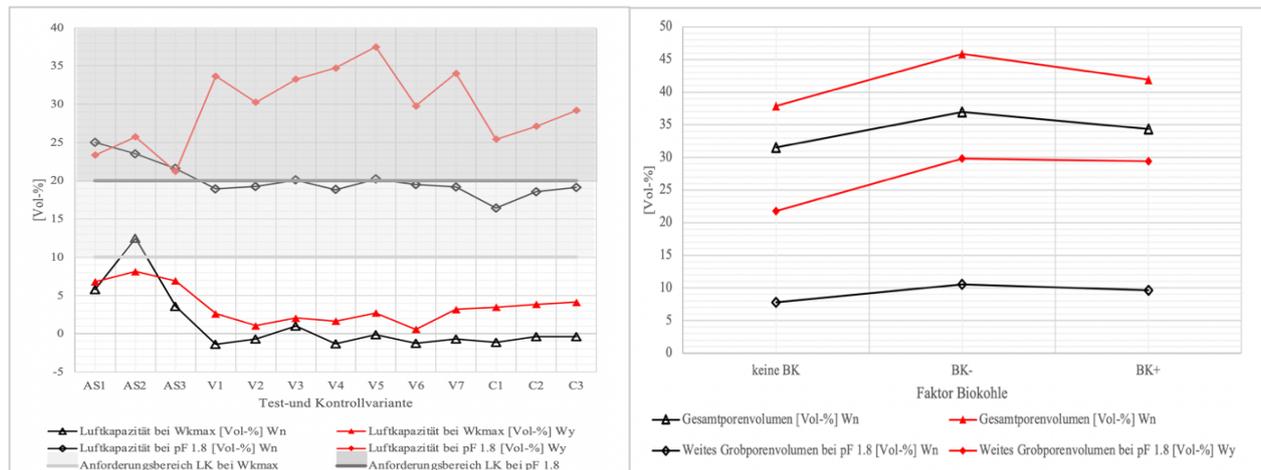


Abbildung 11. Grafiken zum Lufthaushalt: Auf der linken Seite ist die Luftkapazität (LK) bei maximaler Wasserkapazität und bei pF 1.8 von allen Bodenproben mit (Wy) und ohne Wolle (Wn) aus allen Ausgangssubstraten (AS), Testvarianten (V) und Kontrollen C sowie die dazugehörigen FLL-Anforderungsbereiche dargestellt. Die rechte Grafik zeigt das Gesamtporenvolumen sowie weites Grobporenvolumen bei pF 1.8 der Wn- und Wy-Proben für die unterschiedlichen Faktorstufen der Biokohle.

Die Werte für das GPV und für das PV_{pF 1.8} für die Wn und Wy-Proben zeigen ähnliche Resultate. Die Samples mit Wolleinbau weisen gegenüber den Proben ohne Wolle grössere Hohlräume auf. Der Unterschied ist besonders für das GPV sehr deutlich (Abbildung 10, rechts). Ausserdem weisen die Parzellen mit Zuschlag von BK insgesamt ein verbessertes Porenvolumen auf. Der Einbau von Wolle sowie der Zuschlag von BK haben ebenfalls einen positiven Effekt auf die Volumengewichte bei WKmax und die Rohdichten im trockenem Zustand (Tab. 6).

Tabelle 6. Volumengewichte bei WKmax und im trockenem Zustand für die Wn- und Wy-Samples der Faktorstufen für Biokohle.

Faktorstufe	Volumengewichte bei WKmax [g/cm ³]		Volumengewichte trocken [g/cm ³]		Total mean	sd
	Wn Sample	Wy Sample	Wn Sample	Wy Sample		
BKn	1.84	1.72	1.52	1.38	1.62	0.21
BK ⁻	1.62	1.66	1.24	1.23	1.44	0.23
BK ⁺	1.77	1.67	1.41	1.27	1.53	0.23
Tot. Mittelwert	1.74	1.68	1.39	1.29		
sd	0.12	0.03	0.14	0.08		

Bodentextur

Die Voruntersuchung von den verwendeten Ausgangssubstraten zeigte, dass die Korngrösseverteilung des Ausgangssubstrats AS1 mit der Beigabe von BK⁺ fast ganz innerhalb des FLL-Anforderungsbereichs liegt. Das AS2 mit der Beigabe von ungeladener BK⁻ weicht bei einer Partikelgrösse im Bereich Grus und Kies ($\geq 4\text{cm}$ bis $\leq 9\text{cm}$) im Massenanteil leicht von den Richtlinien ab (- 2.64 %), während das AS3 ohne Beigabe von BK die stärkste Abweichung aufweist (Abbildung 12).

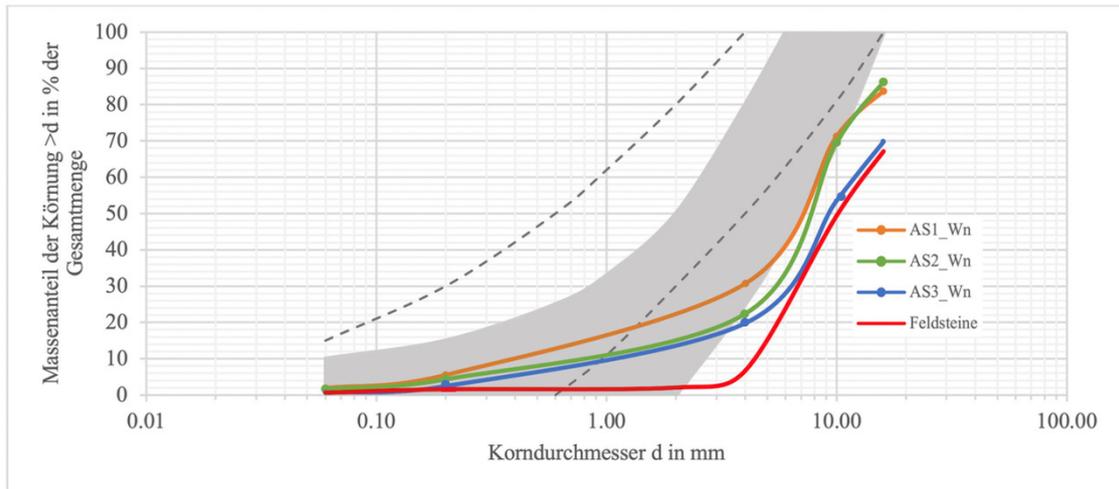


Abbildung 12. Resultate der Voruntersuchung: Korngrösseverteilung der Ausgangssubstrate, der verwendeten Feldsteine, sowie Anforderungsbereiche für einschichtige (grau hinterlegt) und mehrschichtige (gestrichelt) Dachsubstrate.

Die Test- und Kontrollvarianten liegen fast ganz im Anforderungsbereich mit einer minimalen Abweichung beim Massenanteil der Gesteinsdurchmesser $\geq 10\text{cm}$. Variante 4 mit BK⁺ zeigt die geringste Abweichung (Abbildung 13).

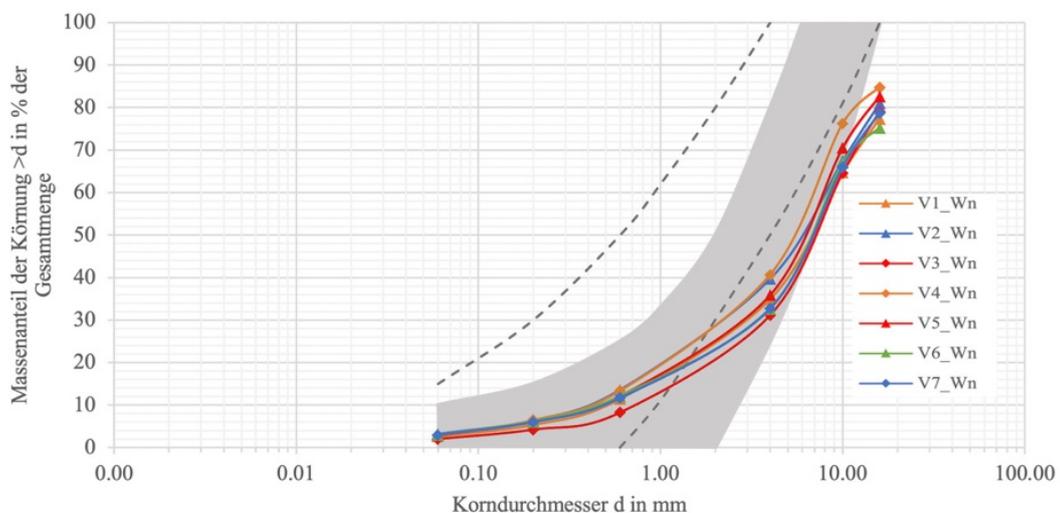


Abbildung 13. Korngrösseverteilung der Testvarianten sowie Anforderungsbereiche für einschichtige (grau hinterlegt) und mehrschichtige (gestrichelt) Dachsubstrate

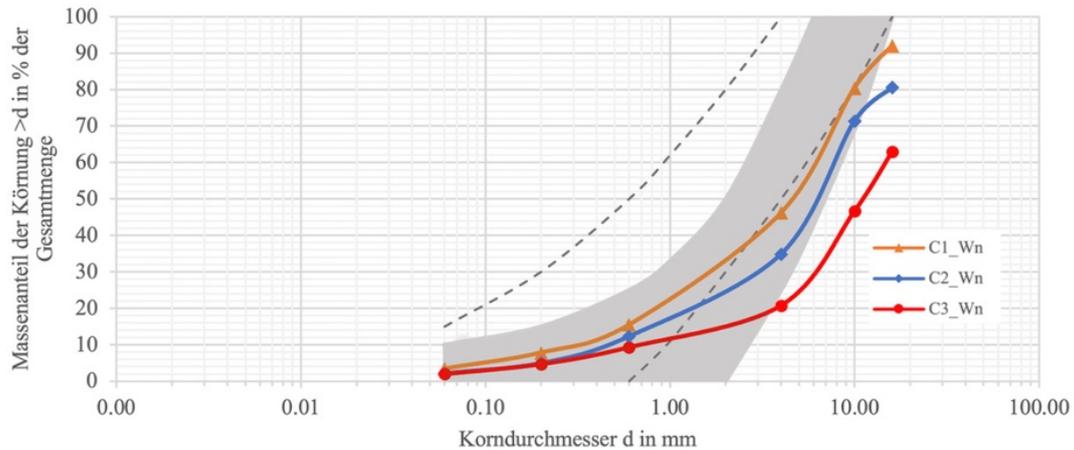


Abbildung 14. Korngrößenverteilung der Kontrollvarianten sowie Anforderungsbereiche für einschichtige (grau hinterlegt) und mehrschichtige (gestrichelt) Dachsubstrate

Die beiden Kontrollen C1 und C2 ohne BK liegen ebenfalls mit Ausnahme einer Abweichung im Massenanteil ab einer Partikelgrösse $\geq 10\text{cm}$ innerhalb des Anforderungsbereichs. Kontrolle C3 weicht bereits ab Korndurchmesser $\geq 10\text{cm}$ von den Richtlinien ab (Abbildung 14).

Einen Blick auf den Feinboden zeigt, dass der Anteil an Schluff und Ton bei allen Varianten im Anforderungsbereich liegt, wobei wiederum die BK^+ -Varianten ($2.98\% \pm \text{sd } 0.22$) und BK^- -Varianten ($2.63\% \pm \text{sd } 0.56$) höhere Massenanteile als die Varianten ohne BK ($2.45\% \pm \text{sd } 0.81$) aufweisen. Weitaus deutlicher sichtbar ist dieser Unterschied bei den Ausgangssubstraten, wo der prozentuale Schluffanteil ohne BK bei 0.6% liegt, während dieser beim AS1 mit BK^+ mit 1.8% um das Dreifache höher ist.

3.1.1 Abbaurrate von Schafswolle

Die durchschnittliche Zerfallsrate (k) von SW^- ($0.0088 \pm \text{sd } 0.001$) liegt leicht unter der mittleren Abbaurrate von SW^+ ($0.0076 \pm \text{sd } 0.0019$). Die Zerfallsgeschwindigkeit von unbehandelter SW^- ist demnach leicht erhöht. Gemäss k werden jedoch SW^+ , wie SW^- einer mittleren Abbaugeschwindigkeitsklasse zugeordnet.

3.1.1 Nährstoffanalysen

Pflanzenverfügbare Nährstoffe

Die leicht löslichen, pflanzenverfügbaren Kalium-, Nitrat und Phosphorfraktionen liegen für alle Test- und Kontrollvarianten innerhalb des Anforderungsbereichs (Abbildung 14, links), wobei die BK^+ -Varianten insgesamt die höchsten Konzentrationen aufweisen ($K = 363.76 \pm \text{sd } 31.87$, $PO_4 = 146.17 \pm \text{sd } 8.5$, $Mg = 300.62 \pm \text{sd } 18.11$, $NO_3 = 25.5 \pm \text{sd } 11.5$). Die N-Spezies NO_3 wird hier als Proxy für den pflanzenverfügbaren Stickstoff verwendet.

Grundsätzlich ist aufgrund des fehlenden NH_4^- Gehaltes daher von einem grösseren Stickstoffangebot auszugehen. Der Anteil an pflanzenverfügbaren Nährelementen bei BK^- ($\text{K} = 189.48 \pm \text{sd } 35.38$, $\text{PO}_4 = 71.35 \pm \text{sd } 6.99$, $\text{Mg} = 193.14 \pm \text{sd } 1.43$, $\text{NO}_3 = 21.43 \pm \text{sd } 2.67$) und BKn ($\text{K} = 215.09 \pm \text{sd } 42.37$, $\text{PO}_4 = 110.89 \pm \text{sd } 13.18$, $\text{Mg} = 215.09 \pm \text{sd } 44.27$, $\text{NO}_3 = 20.06 \pm \text{sd } 4.92$) sind demgegenüber reduziert. Die grossen Standardabweichungen zeigen jedoch, wie variabel die Messungen innerhalb einer Faktorgruppe waren. Die Parallelität zwischen den Nährstoffgehalten in den Testvarianten und denjenigen in den Ausgangssubstraten, in welchen keine Wolle verwitterte, zeigt, dass ein grosser Teil des Nährstoffvorrats von P und Mg bereits in der pyrolierten Biomasse selbst gespeichert war. Für N konnte diese Parallelität nicht festgestellt werden. Ein grosser Teil des Ursprungs von N wird daher auf die Wolle zurückgeführt.

Der Gehalt an verfügbaren Mg-Mineralstoffen ist für die Parzellen, welche mit BK^+ aufgeladen wurden ebenfalls erhöht und liegt bei diesen über dem Richtwert von 200 mg/L, was wiederum in den höchsten Werten beim AS1 resultiert (Abbildung 14, rechts).

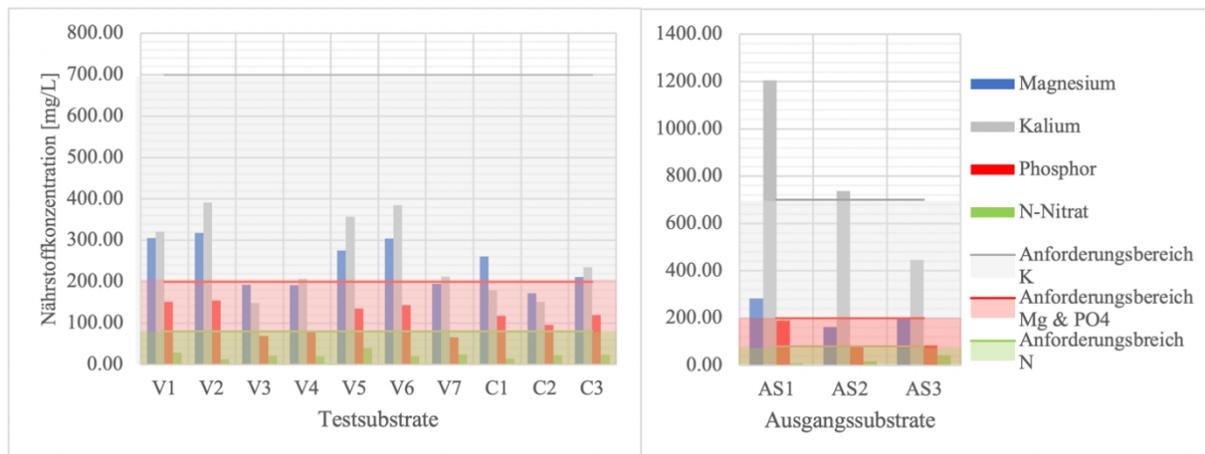


Abbildung 15. Unmittelbar lösliche Fraktionen der Nährelemente Kalium, Phosphor und Magnesium dargestellt als gewichteter Mittelwert von doppelter EDTA-Extraktion und einfacher H_2O_{10} -Extraktion, unmittelbar lösliche NO_3^- Fraktion gemessen mittels Langetes sowie FLL - Anforderungsbereiche für die pflanzenverfügbaren K-, Mg-, N- und PO_4^- - Konzentrationen. Links: Verfügbarkeit der Nährstoffe in den Test- und Kontrollvarianten berücksichtigt die Zersetzung von Schafswolle. Rechts: Verfügbarkeit der Nährstoffe bei den Ausgangssubstraten ohne Zugabe von Schafswolle.

Gesamtgehalte

Um Aussagen über die Düngeszustände und die Reservenährstoffe der Kleindächer zu generieren, wurden zusätzlich die Totalgehalte des Substrates mit den Sickerwasserkonzentrationen abgeglichen (Abbildung 16). Die Totalgehalte von Mg, P und K wurden mittels Königswasseraufschluss gemessen. Die N Totalgehalte anhand des CHN-Analyzers.

Die Totalgehalte von K widerspiegeln weder die pflanzenverfügbaren Vorräte noch die Auswaschkonzentrationen. Die grössten Vorräte sind in den Kontrollen mit Kompost und ohne Biokohle (Abbildung 16) zu finden. Gleichzeitig ist die Verfügbarkeit von K für Pflanzen auf diesen Parzellen reduziert (Abb. 14).

Zudem sind die Auswaschungssignale von K bei den Parzellen V1, V2, V3, V4 mit BK und vorbehandelter Schafswolle reduziert (Abbildung 16). Die Mg-Gesamtgehalte korrelieren mit Kalium. Die höchsten Mg-Gesamtgehalte werden ebenfalls in den Kontrollsubstraten C1 und C2 mit Kompost und vorbehandelter Wolle gemessen, während die pflanzenverfügbaren Nährstoffe bei BK⁺ Parzellen höher liegen. Trotz insgesamt hohen Gesamtgehalten bleibt aber die Auswaschung an Mg- Ionen über die gesamte Zeit relativ gering (3.63 mg/L ± sd 3.66).

Variante V7 (BK⁻, SW⁻) zeigt für P, Mg und NO₃ deutlich reduzierte Auswaschungssignale. Alternierende Signale, welche dem Verlauf der Schichtung folgen, sind zudem bei Mg, P und NO₃ sichtbar. V1, V3, V5 und V7 mit SW^m zeigen leicht reduzierte Sickerwasserkonzentrationen auf.

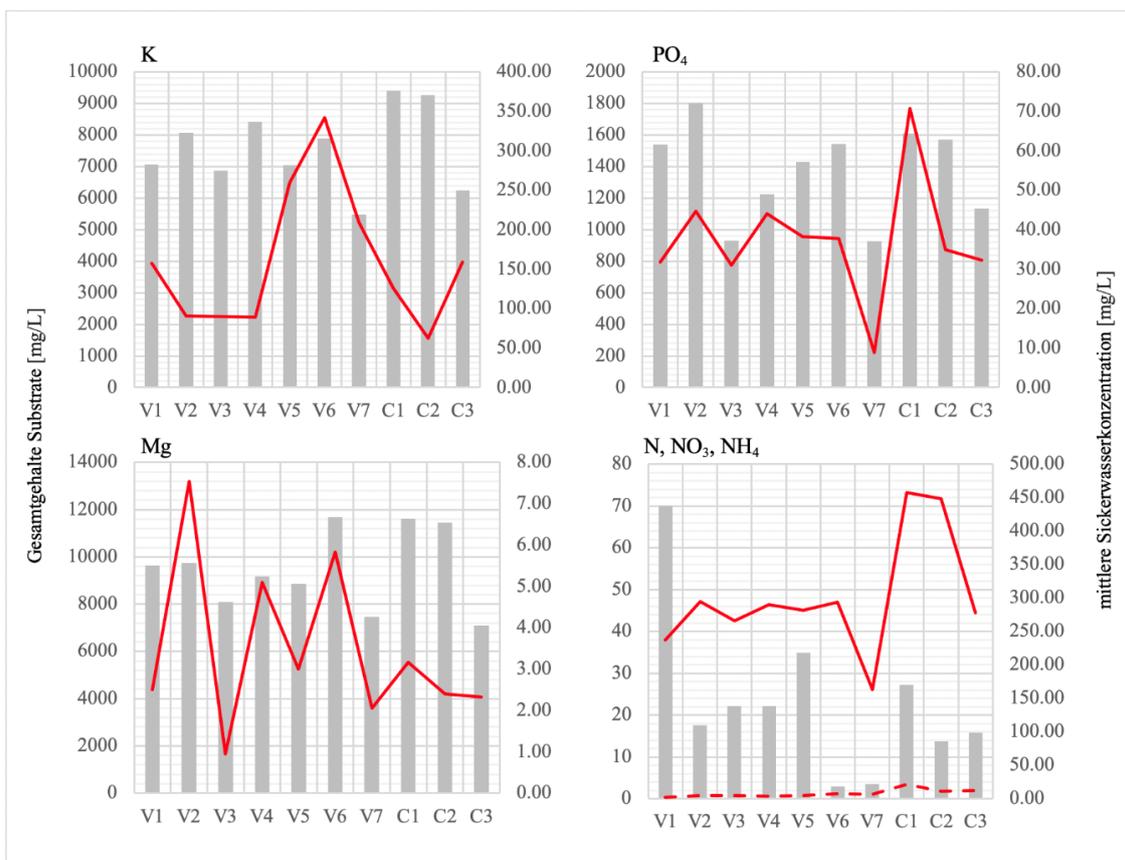


Abbildung 16. Die Nährstoff-Totalgehalte (linke Y-Achse) gemessen im Substrat (grau) gegenüber den mittleren Sickerwassersignalen (rot) (rechte Y-Achse). Die Y-Achsen sind unterschiedlich skaliert. Links oben: Kalium (Tot.) & K⁺ (Sickerwasser), rechts oben: Phosphor (Tot.) & PO₄ (Sickerwasser), links unten: Magnesium (Tot.) & Mg (Sickerwasser), rechts unten: Stickstoff (Tot.) & N-Spezies, NO₃ (Sickerwasser) ist mit einer durchgezogenen Linie dargestellt, NH₄ (Sickerwasser) mit einer gestrichelten Linie.

Corg und Gesamtkohlenstoff

Bei Betrachtung des organischen und anorganischen Kohlenstoffanteils (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) sind drei deutliche Signale sichtbar. Der geringe Anteil der organischen Substanz (OS) bei der Variante V3 mit ungeladener BK⁻, aber vorbehandelter SW⁺ resultiert aus einem geringen, organischen Kohlenstoffanteil und verweist auf reduzierte Mineralisierungsprozesse und eine geringe biologische Aktivität. Gleichzeitig ist das anorganisch gebundene C bei derselben Variante reduziert. Umgekehrt verhält sich die Variante 2 mit BK⁺ und SW⁻, welche einen erhöhten Anteil an

organischer Substanz sowie eine Zunahme des Gesamtkohlenstoffs aufweist. Der Spitzenwert des Ctot liegt bei der Variante V7 (BK⁻, SW⁻), hier ist jedoch keine Parallelität zum Corg feststellbar.

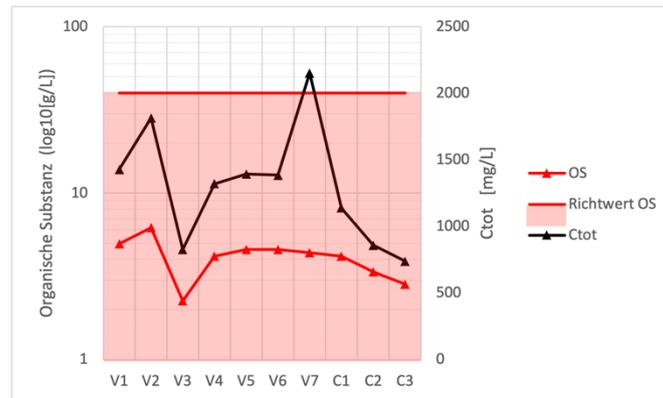


Abbildung 17. Darstellung der C-Spezies: Anteile an organischer Substanz (OS), welche auf Grundlage des Corg berechnet wurde sowie deren Anforderungsbereich (rot) und der totale anorganische Kohlenstoffanteil (Ctot).

3.2 SICKERWASSERANALYSEN

3.2.1 pH- und elektrische Leitfähigkeit

Der durchschnittliche pH- Wert im Sickerwasser (pH_S) aller Testvarianten liegt zwischen 7.9 bis 8.2, mit einer durchschnittlichen sd ± 0.5. Bei der Kontrolle C2 ohne BK ist der Mittelwert und die Standardabweichung leicht erhöht (8.6 sd ± 0.9). Das Sickerwassersignal zeigt also einen sehr stabilen pH über alle Varianten und liegt im absoluten Mittel bei 8.1. Die Analyse der austauschbaren H⁺-Ionen der Bodenlösung (pH_B) zeigt ähnlich beständige Resultate über alle Varianten. Ein stabiler pH (7.3 sd ± 0.3) ist mit Ausnahme von AS2 erkennbar. Hier ist der pH leicht erhöht (Tab. 7).

Tabelle 7. Durchschnittliche elektrische Leitfähigkeit (EC) und pH nachgewiesen im Sickerwasser (S) über die Messperiode Februar 2021 bis Juni 2021 sowie die Messwerte aus der Bodenlösung (B), doppelt erhoben im Filtrat der 1.5 H₂O Volumenextraktion.

Variante	Ø EC _S [µS/cm]	sd EC [µS/cm]	Ø pH _S	sd pH	Ø EC _B [µS/cm]	Ø pH _B
V1	1063.2	544.5	8.1	0.3	909	7.1
V2	1214.5	698.8	8.0	0.3	434	7.3
V3	993.6	313.1	8.2	0.5	713	7.2
V4	1084.5	426.0	7.9	0.2	562	7.1
V5	1510.8	640.3	8.1	0.3	842.5	7.1
V6	939.8	1346.9	8.0	0.3	802	7.0
V7	1157.2	515.2	8.1	0.2	727.5	7.1
C1	1366.4	825.1	7.8	0.1	767.5	7.1
C2	1302.4	674.5	8.6	0.9	971	7.1
C3	1436.0	834.3	8.0	0.4	757.5	7.1
AS1					1193.5	7.1
AS2					979	7.7
AS3					2081	7.2
Ø Total	1206.8	681.9	8.1	0.4	903.0	7.3

Die durchschnittliche, erhobene elektrische Leitfähigkeit des aufgefangenen Sickerwassers ist zwischen den Varianten stark variierend mit einer maximalen Standardabweichung von 1346.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei V6 (SW^- , SW^u , BK^+). Der Vergleich auf Faktorstufe zeigt weiter, dass bei ungeladener BK^- die EC-Werte im Sickerwasser reduziert, bei un behandelter SW^- sowie bei Varianten mit SW^u die Werte leicht erhöht sind (Abbildung 18, links). Die statistische Auswertung zeigte für den gesamten Datensatz, dass die EC-Werte einerseits stark vom Zeitpunkt der Messung abhängen, was auf die starken zeitlichen Schwankungen zurückzuführen ist. Zusätzlich konnte bei vielen Varianten nachgewiesen werden, dass der Faktor Biokohle die stärkste signifikante Wirkung auf die Sickerwassersignale hat, während in der Post-hoc Analyse von den 11 geprüften Teildatensätzen der Behandlungseffekt die EC nur bei der V3 (SW^+) die gegenüber der V7(SW^-) signifikant reduzierte. Trotz der leicht reduzierten Auswaschung von Salzen bei den Varianten, welche SW mittig eingebaut hatten, gegenüber SW^u -Varianten konnte dieser Zusammenhang nicht statistisch nachgewiesen werden.

Die Messwerte der Bodenlösung (Tab. 7, EC_B) zeigen ähnlich starke Schwankungen ($903 \text{ sd} \pm 401.98$).

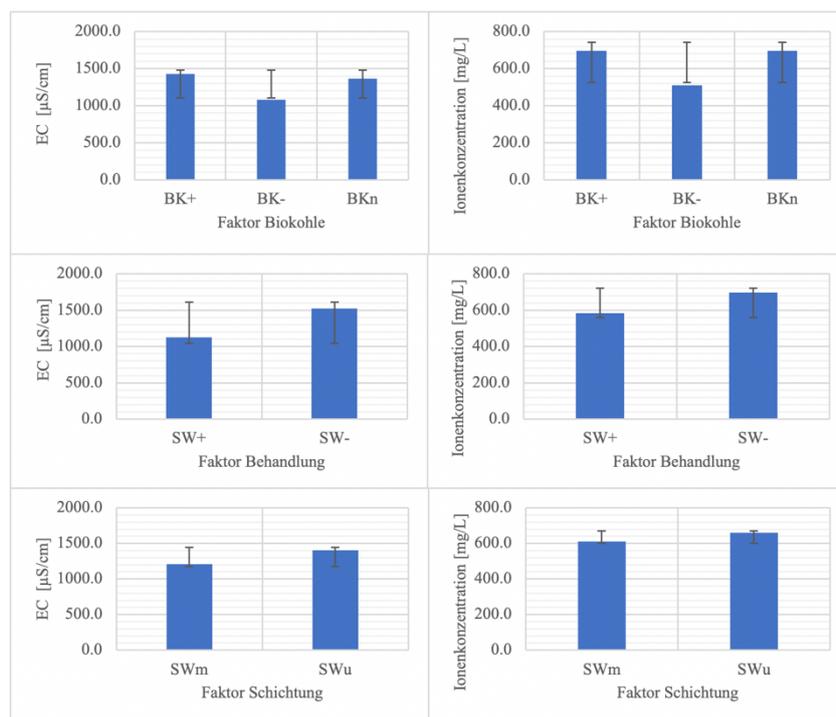


Abbildung 18. Durchschnittliche elektronische Leitfähigkeit im Sickerwasser (links) und mittlere totale Ionenkonzentration (berechnet aus der Summe von allen Na^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}) im Sickerwasser (rechts) dargestellt für alle Faktorstufen.

3.2.2 Ionenkonzentration im Sickerwasser

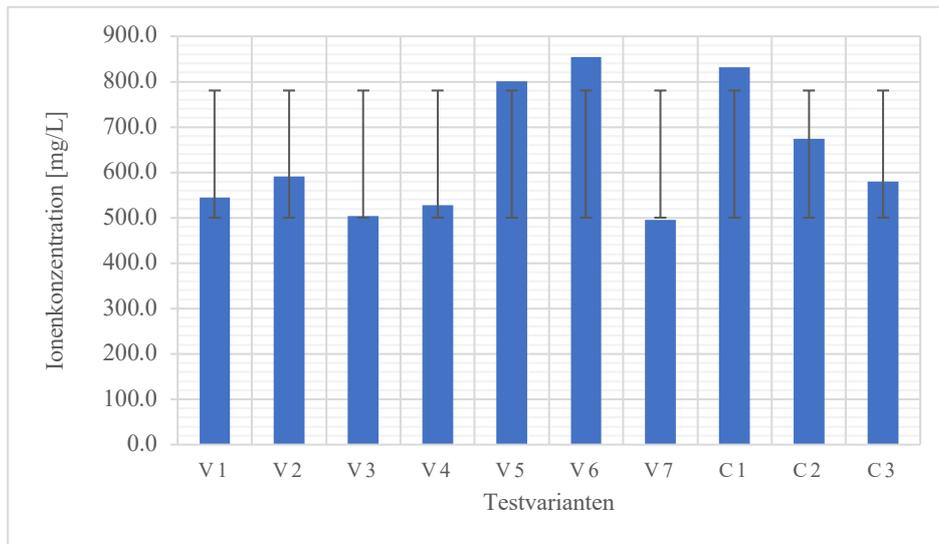


Abbildung 19. Mittlere Ionenkonzentration aus der Gesamtsumme aller gemessenen Kationen und Anionen (Na^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}) im Zeitraum Februar bis Mai 2021 für alle Test- und Kontrollvarianten.

Die Werte der absoluten Ionenkonzentration decken sich mit der EC des Sickerwassers (Abbildung 18, rechts). Die statistischen Analysen haben gezeigt, dass alle Ionen signifikant vom Messzeitpunkt abhängen, zusätzlich weisen Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} einen stark signifikanten Zusammenhang zur unabhängigen Variablen BK auf. Ungeladene BK^- entfaltet wiederum eine reduzierende Wirkung auf die Mineralauswaschung. Zwar war bei der mittleren Schichtung (SW^m) der Ionengehalt im Auswaschungswasser ebenfalls geringer als bei SW^u , dieser Unterschied konnte jedoch ebenfalls nicht statistisch nachgewiesen werden. Die mittlere Ionenkonzentration aus der Gesamtsumme aller gemessenen Kationen und Anionen für alle Test- und Kontrollvarianten ist in der Abbildung 19 dargestellt. Die Darstellung zeigt nochmals, dass für SW^m (V1, V3, V5, V7) insgesamt ein geringeres Auswaschungsrisiko besteht, während die Varianten mit BK^- (V3, V4, V7) ebenfalls reduziertere Signale aufweisen.

Im Hinblick auf den Effekt der Wollbehandlung zeigte sich bei Kalium zusätzlich einen stark signifikanten Zusammenhang. Varianten mit unbehandelter SW zeigten signifikant höhere Kaliumkonzentrationen im Sickerwasser (Abbildung 19, links). Die starke Löslichkeit von K^+ (759.23 mg/L sd \pm 1286) durch die Vorbehandlung der Wolle wurde auch in den Sickerwasserproben der Wollwäsche sichtbar (Abbildung 19, rechts). NO_3^- scheint hingegen weniger stark aus der Wolle mobilisiert zu werden. Die Konzentration von NO_3^- bleibt über alle drei Waschgänge konstant (15.19 mg/L sd \pm 1.5) (Abbildung 19, rechts). Ausserdem zeigte sich für die durchschnittliche Auswaschung von NO_3^- ein inverses Muster im Zusammenhang mit der Vorbehandlung. So war die Auswaschung bei den SW^+ Varianten (271.81 mg/L) gegenüber den unbehandelten SW^- - Parzellen (246.13 mg/L) erhöht.

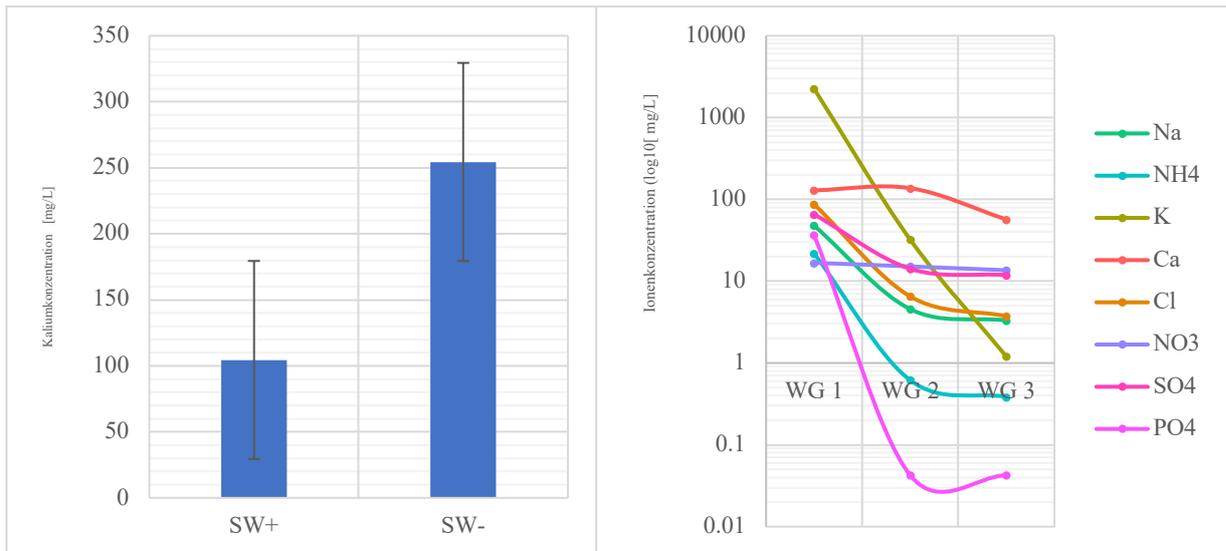
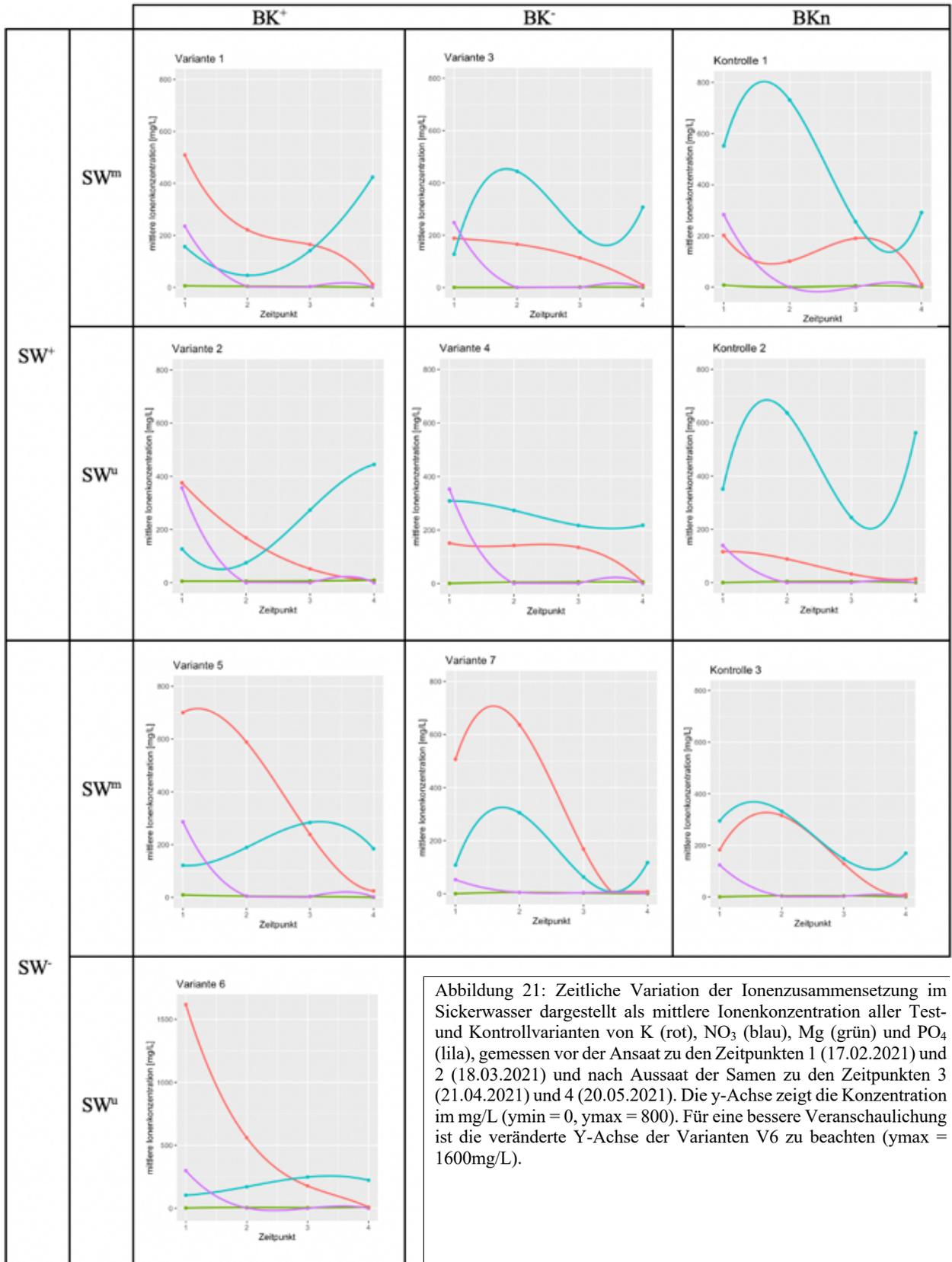


Abbildung 20. Veränderung der Kaliumkonzentration durch die Vorbehandlung. Links: Mittlere Kaliumkonzentration im Sickerwasser bei Parzellen mit gewaschener Schafswolle, gegenüber Parzellen mit un behandelter Wolle. Die K-Konzentration wurde dargestellt, da ein signifikanter Zusammenhang zur Vorbehandlung festgestellt werden konnte. Die Grafik rechts zeigt die Ionenkonzentration beim austretenden Sickerwasser während der Vorbehandlung der Wolle, wobei die Waschgänge mit WG angegeben sind und aufeinanderfolgend sind.

Die zeitliche Variation der Ionenkonzentration von NO_3 , K, Mg und PO_4 im Abflusswasser ist in Abbildung 20 dargestellt, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Zeitpunkte 1 und 2 vor der Pflanzenansaat stattgefunden haben. Die vier Nährelemente wurden geplottet, da diese in Hinblick auf die Pflanzenverfügbarkeit und Totalgehalte ebenfalls analysiert wurden.

Auffallend ist die Stabilität des stark reduzierten Mg-Signals über die gesamte Messperiode, welche bei allen Varianten sichtbar war. PO_4 zeigt überall eine ähnliche Abnahme und ist ab dem 2. Messzeitpunkt kaum nachweisbar. Starke zeitliche Variation sind hingegen die Kalium- und Nitratkonzentrationen ausgesetzt. Die Löslichkeit von K und der damit verbundene starke Verlust bei un behandelter Wolle ist auch hier sichtbar, wobei die Abnahme bei Parzellen mit vorbehandelter SW^+ moderater verlief. Die stabilsten K^+ -Signale konnten in den V3 und V4 beobachtet werden, welche mit ungeladener und vorbehandelter Wolle angereichert waren. Im Gegensatz dazu ist bei den Varianten V5 und V6 mit SW^- und BK^+ ein starker Rückgang des K-Ions erkennbar. Bei einem Blick auf die NO_3 -Abflusswerte sind die moderatsten Werte bei V4 (BK^- , SW^+) sowie bei V5 und V6 (BK^+ , SW^-) zu verzeichnen. Insgesamt zeigte sich bei NO_3 eine Reduzierung der Spitzenabflusswerte durch die die Zugabe von BK^- , aber auch durch die Zugabe von SW^- .



Um die Signifikanz des organischen Wollzusatzes auf die Nährstoffkreisläufe im Substrat besser zu verstehen, wurden zusätzlich die Sickerwasserdaten der Vorstudie berücksichtigt (Tab. 8). Die Variante V4 der Vorstudie wurde ohne Wolle und mit einem organischen Layer aus Miscanthus-Stroh angereichert. Ihr BK-Anteil von 15% entsprach dem Gehalt der dieser Arbeit zugrunde liegenden Testvarianten und wird deshalb als weitere Kontrolle integriert (C_{V4}). Die Variante V5 der Vorstudie (C_{V5}) lässt ebenfalls Rückschlüsse auf die Schichtung der Wolle zu, da sie gleich wie die Variante V7 SW^- und BK^- enthält. Ihr BK-Anteil ist hingegen um 5% reduziert.

Um eine möglichst geringe Abweichung in der Zeitperiode zwischen Projektinitiierung und Messung zu erhalten, wurde bei der Vorstudie die erste Ionenmessung (geschätzter Zeitraum: 3 – 6 Monate) und bei der aktuellen Studie die Messung nach drei Monaten berücksichtigt.

Tabelle 8. Effekt der Schafswolle auf die mittleren Ionenkonzentrationen: Die mittleren Ionenkonzentrationen über alle Testvarianten mit BK^+ (V_{BK^+}) und mit BK^- (V_{BK^-}) mit dem Einbau von Schafswolle im Vergleich zu der Testvariante V4 und V5 der Vorstudie, welche hier als Kontrollen C_{V4} und C_{V5} benannt werden. C_{V4} wird als repräsentative Vergleichsvariante dargestellt, da sie ebenfalls 15% BK-Anteil enthielt. Dargestellt sind die mittleren Konzentrationen der BK^+ - und BK^- -Varianten und der Variante 7 zum Messzeitpunkt 4 sowie die mittleren Konzentrationen der C_{V4} und C_{V5} zum Messzeitpunkt 1.

	Mg [mg/L]	K [mg/L]	NO_3 [mg/L]	NH_4 [mg/L]	PO_4 [mg/L]
V_{BK^+}	4.59	13.90	418.65	6.88	0.86
V_{BK^-}	1.83	7.69	283.97	5.20	0.04
V7	0.87	8.11	234.48	6.75	0.04
C_{V4}	3.28	30.56	0.95	0.35	0.57
C_{V5}	4.98	63.89	22.31	14.16	0.36

Der Zusatz Wolle verursacht einen starken Anstieg der beiden Stickstoffspezies NO_3 und NH_4 , wobei die ungeladene BK auf beide Elemente eine Retentionswirkung zeigte. Bei NO_3 waren die Abflusswerte bei SW^- jedoch reduziert. Für Mg und K ist durch das Beifügen von Wolle zwar ebenfalls ein Anstieg aus den Resultaten der Vorstudie erkennbar, beim Vergleich zwischen V_{BK^-} und C_{V4} findet sich jedoch die stärkere Auswaschung bei der Kontrollvariante ohne Schafswolle. PO_4 zeigt im Hinblick auf dessen Herkunft nur geringe Unterschiede zwischen den Varianten mit SW und ohne SW , was einen Hinweis darauf gibt, dass grössere Teile des Vorrats PO_4 auch aus der BK selbst stammen.

Der Vergleich der Schichtung zwischen V7 und C_{V5} zeigt den reduzierenden Einfluss von SW^m auf alle Mineralstoffe (ausser NO_3).

3.3 VEGETATIONSENTWICKLUNG

3.3.1 Ausgesäte und spontane Arten: Keimungs- und Etablierungsrate

Nach drei Monaten konnten sich alle eingeführten Arten (Tab. 9) etablieren, wobei *Bromus erectus*, *Papaver rhoeas*, *Silene vulgaris* und *Sedum rupestre* auf allen 24 Kleindächern zu finden waren und sie von den eingeführten Arten die höchste durchschnittliche Deckung (%) aufwiesen. Insgesamt wurden 37 Arten gefunden, von denen 32 auf Artenniveau bestimmt werden konnten (Tab. 9). Nebst den ausgesäten, repräsentativen Arten, zeigten *Chenopodium album* (9.29 %), *Lolium perenne* (1.79 %) und *Trifolium repens* (1.88 %) den höchsten mittleren Deckungsgrad. Die mittlere Deckung sowie die Frequenz aller gefundenen Arten für die einzelnen Parzellen sind im Anhang 5 einzusehen.

Tabelle 9. Oben: Pflanzenarten, welche auf den Kleindächern eingeführt wurden und Menge (g) (Samen von 7 Arten mit einer Rate von 3 g/m² und *Sedum rupestre* - Sprossen mit einer Rate von 68g/m²). Unten: Arten, welche sich spontan etabliert haben. Die Artendeckung wird über den mittlere Deckungsgrad pro Parzelle (Deckung %) angegeben, die Häufigkeit (Freq) beschreibt die Anzahl der Parzellen, in denen die Art vorhanden waren.

Eingeführte Arten			
Pflanzenart	Menge [g]	Mittlere Deckung 2021 [%]	Frequenz 2021(Anz. Plots)
<i>Bromus erectus</i>	13	1.45	24
<i>Dianthus carthusianorum</i>	3	0.14	13
<i>Lotus corniculatus</i>	4	0.21	17
<i>Papaver rhoeas</i>	1	6.74	24
<i>Salvia pratensis</i>	6	0.13	14
<i>Sanguisorba minor</i>	6	0.03	4
<i>Sedum rupestre</i>	690	5.81	24
<i>Silene vulgaris</i>	3	1.87	24

Spontane Arten					
Pflanzenart	Mittlere Deckung 2021 [%]	Frequenz 2021(Anz. Plots)	Pflanzenart	Mittlere Deckung 2021 [%]	Frequenz 2021(Anz. Plots)
<i>Amaranthus blitum</i>	0.05	2	<i>Holcus lanatus</i>	0.75	4
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	0.13	3	<i>Lactuca serriola</i>	0.83	1
<i>Cerastium fontanum</i>	0.04	2	<i>Lolium perenne</i>	1.79	7
<i>Chenopodium album</i>	9.29	18	<i>Lolium multiflorum</i>	1.04	3
<i>Chenopodium polyspermum</i>	1.01	7	<i>Oxalis stricta</i>	0.01	1
<i>Chenopodium suecicum</i>	0.25	1	<i>Polygonum aviculare</i>	0.73	4
<i>Cichorium intybus</i>	0.17	1	<i>Polygonum persicaria</i>	1.21	4
<i>Dactylis glomerata</i>	0.40	3	<i>Rumex obtusifolius</i>	1.06	5
<i>Daugus carotta</i>	0.06	2	<i>Solanum Villosum</i>	0.04	1
<i>Echinochloa crus-galli</i>	0.04	1	<i>Trifolium repens</i>	1.88	12
<i>Galium aparine</i>	0.08	1	<i>Urtica urens</i>	0.08	1
<i>Geranium rotundifolium</i>	0.01	1	<i>Viola arvensis</i>	0.02	1

3.3.2 Kleindach-Aufbauleistung

Hinsichtlich der durchschnittlichen Artenzahl pro Parzelle ($10.19 \pm \text{sd } 2.0$) und der durchschnittlichen Bedeckung ($38.26 \% \pm \text{sd } 10.08$) unterscheiden sich die Varianten stark (Anhang 5). Die höchsten Artenzahlen wurden in den beiden Kontrollen C1 und C2 ohne Biokohle gezählt. Die höchste durchschnittliche Bedeckung wies die Parzelle der Variante 1 auf. Die Signifikanz der Faktorstufen auf die Bedeckung ist in der Tab. 10 dargestellt.

Tabelle 10. Mittlere Vegetationsbedeckung, durchschnittliche Anzahl Arten sowie repräsentative Arten für alle Faktorstufen. Die mit einem Sternchen * markierten Werte, zeigten in der Varianzanalyse einen signifikanten Zusammenhang zwischen Faktor und Deckungsgrad bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$

Faktor	Faktorstufe	durchschnittliche Anzahl Arten	mittlere absolute Deckung [%]	<i>Sedum rupestre</i> (durchschnittliche Bedeckung [%])	<i>Silene vulgaris</i> (durchschnittliche Bedeckung [%])	<i>Papaver rhoeas</i> (durchschnittliche Bedeckung [%])	<i>Bromus erectus</i> (durchschnittliche Bedeckung [%])
Biokohle	BKn	11.67	39.50	6.67	1.17	*1.40	1.53
	BK-	9.11	32.89	5.44	2.61	*8.89	0.8
	BK ⁺	10.17	41.37	5.88	1.49	*6.46	1.91
Schichtung	SW ^m	9.43	33.61	*6.86	1.53	4.97	2.00
	SW ^u	10.70	42.96	*4.35	2.35	6.37	0.93
Behandlung	SW ⁺	11.30	*41.95	*7.05	1.48	4.76	0.96
	SW ⁻	8.67	*32.36	*4.93	2.1	5.94	1.8

Auf Parzellen mit BK⁻ war die tiefste durchschnittliche Bedeckung und geringste durchschnittliche Anzahl Arten vorhanden, gleichzeitig dominierten dort die beiden repräsentativen Arten *Papaver rhoeas* und *Silene vulgaris*.

Parzellen mit gewaschener SW⁺ hatten gegenüber SW⁻ ebenfalls eine signifikant grössere durchschnittliche Bedeckung und mehr unterschiedliche Arten. Die Bedeckung von drei der vier repräsentativen Arten (alle ausser *Sedum rupestre*) waren aber bei SW⁻ erhöht. Einen Zusammenhang zeigte sich auch zwischen der Vegetationsbedeckung und der Schichtung. Die absolute Bedeckung, die Anzahl Arten sowie die Arten *Papaver rhoeas* und *Silene vulgaris* waren beim Wollleinbau unten (SW^u) dominierender als bei SW^m.

Betreffend den ökologischen, auf die individuellen Bedeckungsgrade gewichtete Indikatorenwerte, sind für Bodenchemie ($R = 3.26 \pm \text{sd } 0.14$) ähnliche Werte für alle Varianten zu finden (Abbildung 22, unten). Der Nährstoffgehalt ($N = 3.29 \pm \text{sd } 0.29$) und die Feuchtezahl ($F = 2.31 \pm \text{sd } 0.29$) variieren stärker. Bei dem Feuchteindikator ist dies hauptsächlich auf die höheren F-Werte bei den Kontrollen zurückzuführen. Gleichzeitig konnte sich bei den Kontrollen C1 – C3 die repräsentative, ruderales Zeigerart *Papaver rhoeas* (KS = rrr) weniger gut etablieren. Am häufigsten war diese Art bei V4 (BK⁻, SW⁺, SW^u) vorhanden.

Die Varianten V2 mit der Beigabe von gewaschener SW⁺ und BK⁺ zeigt den höchsten N-Indikator sowie einen insgesamt hohen Deckungsgrad, simultan war aber die Etablierung der repräsentativen Arten gering.

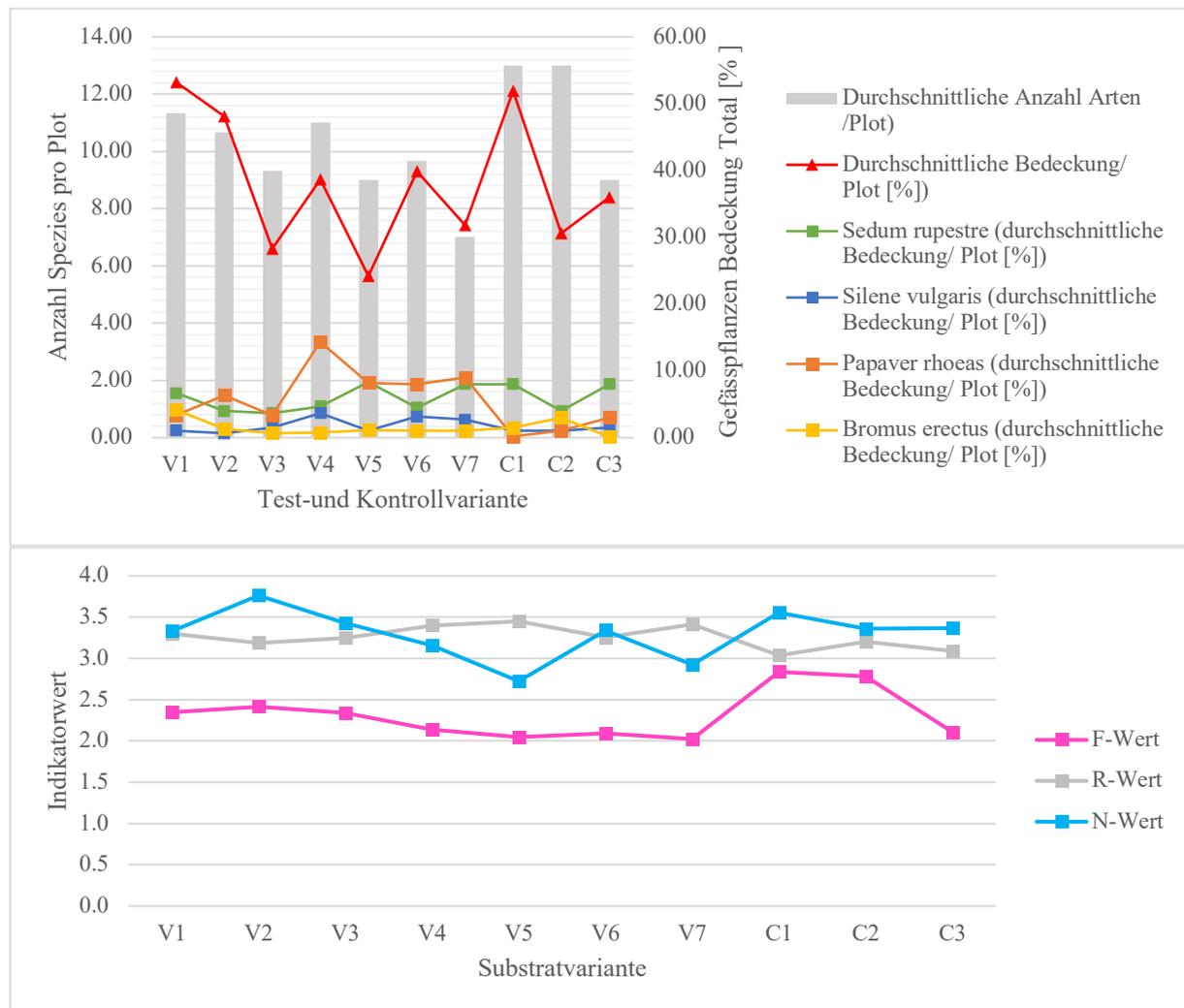


Abbildung 22. Oben: Die Grafik oben zeigt die durchschnittliche Anzahl Arten pro Plot (grau), die durchschnittliche Bedeckung aller Gefässpflanzen/ Plot [%] sowie den durchschnittlichen Deckungsgrad von vier repräsentativen Arten, welche bei der Vegetationsaufnahme im Juni 2021 auf allen Test- und Kontrolldächern gefunden wurden: *Sedum rupestre*, *Silene vulgaris*, *Papaver rhoeas* und *Bromus erectus*.

Unten: Darunter sind die durchschnittlichen bodenbezogenen, ökologischen Indikatorwerte (EIVs) gewichtet auf deren Bedeckungsgrad pro Variante dargestellt: Feuchtezahl (F), Reaktionszahl (R) und Nährstoffzahl (N).

3.3.3 Ökologie der Kleindächer

Die meisten gefundenen Arten waren Therophyten ($t = 12$), gefolgt von langlebigen ($h = 11$) und kurzlebigen Hemicryptophyten ($k-t = 3$), von wenigen krautigen Chamaephyten ($c = 2$), Geophyten ($g-t = 1$) und krautigen, langlebigen ($c-h = 1$). Gemäss den durchschnittlichen ökologischen Zeigerwerten wies der Standort folgende Umweltmerkmale auf: heller Ort mit wenig Schatten ($L = 3.9$), frische bis mässig feuchte Bodenverhältnisse ($F = 2.6$), schwach saure bis neutrale Bodenchemie ($R = 3.3$), mässig bis nährstoffreiche Bodenfruchtbarkeit ($N = 3.5$), subozeanisch bis subkontinentales Klima ($K = 3.1$) und unter montane und ober-kolline Temperaturwerte ($T = 3.7$).

Tabelle 11. Lebensformen (LF), Landolts Ökologische Zeigerwerte (EIVs) und Konkurrenzstrategien (KS) der Arten, die im Juni 2021 auf den Dächern gefunden wurden. Landolts EIVs (Ökologische Zeigerwerte) für T = Temperaturzahl, K = Kontinentalitätszahl; R = Reaktionszahl; N = Nährstoffzahl (Landolt et al., 2010). Arten, gefolgt von einem Sternchen * wurden eingeführt.

Taxon	T	K	L	F	R	N	LF	KS
<i>Amaranthus blitum</i>	4.00	2.00	4.00	2.50	3.00	4.00	t	crr
<i>Bromus erectus</i> *	4.00	4.00	4.00	2.00	4.00	2.00	h	ccs
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	3.00	3.00	4.00	2.00	3.00	4.00	k-t	rrr
<i>Cerastium fontanum</i>	1.50	3.00	4.00	3.00	2.00	4.00	c	crs
<i>Chenopodium album</i>	3.00	3.00	4.00	2.00	3.00	4.00	t	rrr
<i>Chenopodium polyspermum</i>	3.50	3.00	4.00	3.50	4.00	4.00	t	rrr
<i>Chenopodium suecicum</i>	3.50	3.00	4.00	2.50	3.00	4.00	t	rrr
<i>Cichorium intybus</i>	4.00	3.00	4.00	2.50	4.00	3.00	h	crs
<i>Dactylis glomerata</i>	4.00	3.00	4.00	3.00	3.00	4.00	h	crs
<i>Daucus carota</i>	4.00	3.00	4.00	2.50	4.00	2.00	k-t	rss
<i>Dianthus carthusianorum</i> *	4.50	4.00	4.00	1.50	4.00	2.00	h	crs
<i>Echinochloa crus-galli</i>	4.00	3.00	4.00	3.50	3.00	4.00	t	crr
<i>Galium aparine</i>	3.50	3.00	3.00	3.00	3.00	5.00	t.li	crr
<i>Geranium rotundifolium</i>	4.50	4.00	4.00	2.00	4.00	3.00	t	rrr
<i>Holcus lanatus</i>	3.50	3.00	4.00	3.00	3.00	3.00	h	crs
<i>Lactuca serriola</i>	4.50	4.00	4.00	2.00	4.00	4.00	k-t	crr
<i>Lolium perenne</i>	3.50	3.00	4.00	3.00	3.00	4.00	h	ccr
<i>Lolium multiflorum</i>	4.50	2.00	4.00	3.50	3.00	4.00	h-t	ccr
<i>Lotus corniculatus</i> *	3.00	3.00	4.00	2.50	3.00	3.00	h	crs
<i>Oxalis stricta</i>	4.00	2.00	3.00	3.00	3.00	4.00	g-t	rrr
<i>Papaver rhoeas</i> *	4.00	4.00	4.00	2.00	4.00	3.00	t	rrr
<i>Polygonum aviculare</i>	4.00	2.00	4.00	3.50	3.00	4.00	t	rrr
<i>Polygonum persicaria</i>	3.50	3.00	4.00	3.00	3.00	4.00	t	crr
<i>Rumex obtusifolius</i>	3.50	2.00	4.00	3.00	3.00	5.00	h	ccr
<i>Salvia pratensis</i> *	3.50	4.00	4.00	2.00	4.00	2.00	h	crs
<i>Sanguisorba minor</i> *	3.50	3.00	4.00	2.00	4.00	2.00	h	css
<i>Sedum rupestre</i> *	4.50	4.00	4.00	1.50	3.00	2.00	c	sss
<i>Silene vulgaris</i> *	3.00	4.00	4.00	2.50	3.00	2.00	h	crs
<i>Solanum villosum</i>	5.00	2.00	4.00	3.00	3.00	4.00	t	rrr
<i>Trifolium repens</i>	3.00	3.00	4.00	3.00	3.00	4.00	c-h	crs
<i>Urtica urens</i>	3.00	4.00	4.00	2.00	3.00	5.00	t	rrr
<i>Viola arvensis</i>	3.50	3.00	3.00	2.50	3.00	3.00	t	rrr
Mittelwert EIV's	3.7	3.1	3.9	2.6	3.3	3.5		

EIVs: T: 3.5 = unter-montan und ober-kollin, 4 = kollin; K: 3 = subozeanisch bis subkontinental; L: 4 = hell, F: 2.5 = frisch, 3 = mässig feucht, R: 3 = schwach sauer bis neutral (pH 4.5-7.5), 4 = neutral bis basisch (pH 5.5-8.5); N: 3 = mässig nährstoffarm bis mässig nährstoffreich, 4 = nährstoffreich; LF: c = krautiger Chamephyt, g = Geophyt, h = Hemikryptophyt (langjährige), k = Hemikryptophyte (wenigjährig), t = Therophyt. (einjährige); KS: r = Ruderalstrategie, s = Stresstrategie, c = Kompetitive Strategie.

Bezüglich der Konkurrenzstrategie waren die meisten Spezies ruderale Zeigerarten (rrr = 11), gefolgt von crs- Strategen (9). Als stresstolerante Zeigerart (sss) wurde nur die eingeführte *Sedum rupestre* gezählt.

Aufgrund der ökologischen Signifikanz werden im Folgenden nur die ruderalen und stresstoleranten Zeigerarten und deren Verteilung über alle Varianten dargestellt (wobei Anzahl sss-Arten überall = 1).

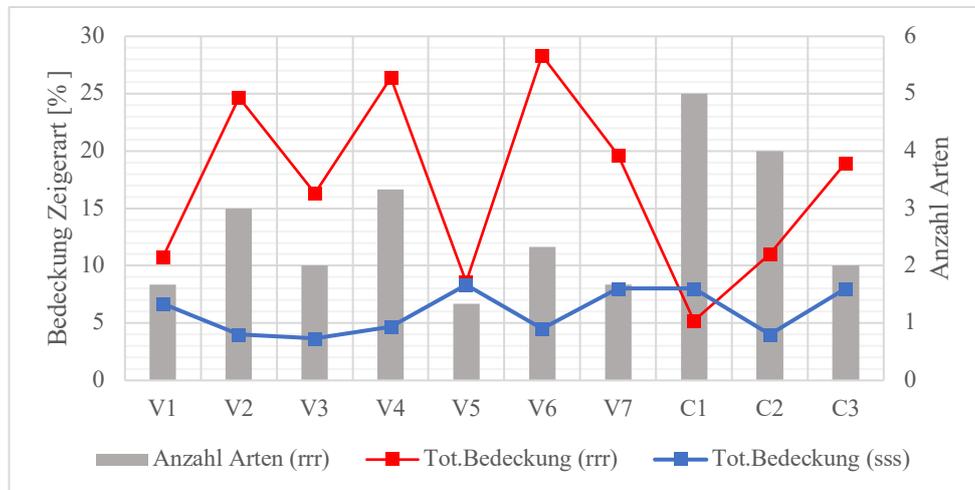
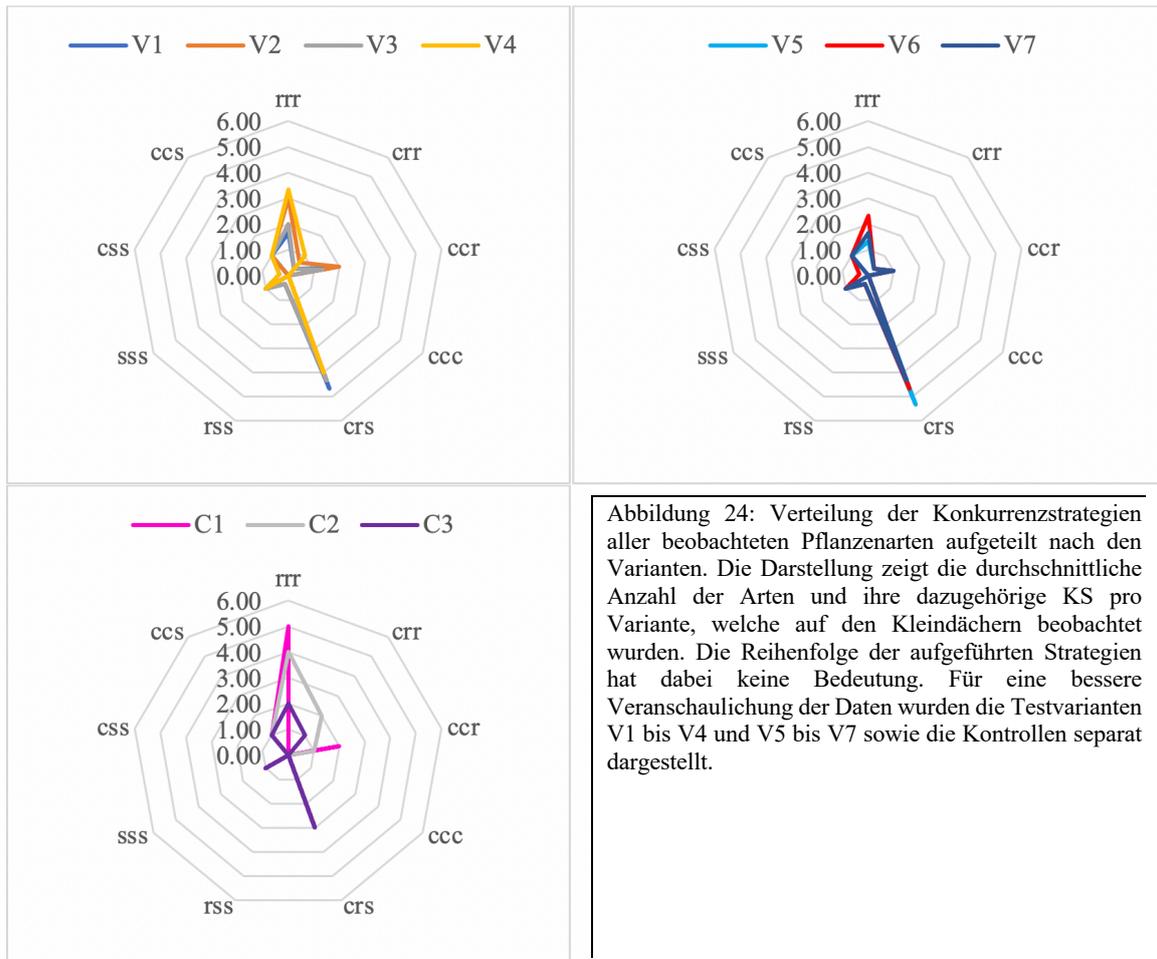


Abbildung 23. Die Bedeckung (%) von Ruderal- und Stresstoleranten Zeigerarten für alle Varianten gemittelt über die Parzellen sowie die Anzahl unterschiedlicher Arten für die Konkurrenzstrategien ruderaler (rrr) und stresstoleranter Zeigerarten (sss) werden hier dargestellt. Die einzige sss-Art war *Sedum rupestre*, deshalb ist hier nur die prozentuale Bedeckung dargestellt.

Bei den Varianten V6 (BK⁺, SW⁺, SW^u) und V4 (BK⁻, SW⁻, SW^u) wurde insgesamt die höchste Bedeckung von ruderalen Arten festgestellt, während bei den Kontrollen C1 die meisten unterschiedlichen R-Arten gezählt wurden (Abbildung 23). Es zeigte sich ein grosser Unterschied in der Etablierung der R-Strategen (Deckungsgrad und Anzahl Arten) im Zusammenhang mit dem Schichtfaktor, wobei bei der mittleren Einbausichtung der Deckungsgrad der R-Strategen deutlich geringer war (SW^m = 13.2%; SW^u = 22.6%). Umgekehrt war bei den Parzellen, welche die Schafswolle mittig eingebaut hatten, eine grössere Anzahl an kompetitiven Übergangsformen (crs, ccr) zu finden.

Obschon insgesamt die meisten unterschiedlich, gezählten Arten den R-Strategen zugeordnet werden können, wurden bei allen Testvarianten durchschnittlich mehr von der intermediären Übergangsform der crs-Strategen gezählt (Abb. 23). Gleichzeitig war wiederum sichtbar, dass die Varianten mit SW^u (V2, V4, V6) insgesamt die meisten R-Strategen aufwiesen. Im Vergleich dazu, ist die durchschnittliche Anzahl crs-Strategen bei den Kontrollen gegenüber den Testvarianten reduzierter.



Die Gruppen von Pflanzenarten (spontan, respektive eingeführte Arten) zeigen ähnliche Durchschnittswerte für Lichtverhältnisse ($L = 3.94 \pm \text{sd } 0.09$) und Temperatur ($T = 3.71 \pm \text{sd } 0.06$). Jedoch unterscheiden sie sich bei der Bodenchemie ($R = 3.4 \pm \text{sd } 0.32$), Bodenfeuchte ($F = 2.39 \pm \text{sd } 0.55$), Kontinentalität ($K = 3.31 \pm \text{sd } 0.62$) und eine starke Abweichung ist beim Nährstoffgehalt zu finden ($N = 3.06 \pm \text{sd } 1.15$) (Abbildung 25, links). Betreffend den LFs waren die meisten spontanen Arten einjährige Arten ($t = 11$), während die erfolgreich eingeführten Arten häufig Hemikryptophyten ($h = 6$) waren (Abbildung 25, rechts). Eingeführte, nicht etablierten Arten waren nicht vorhanden.

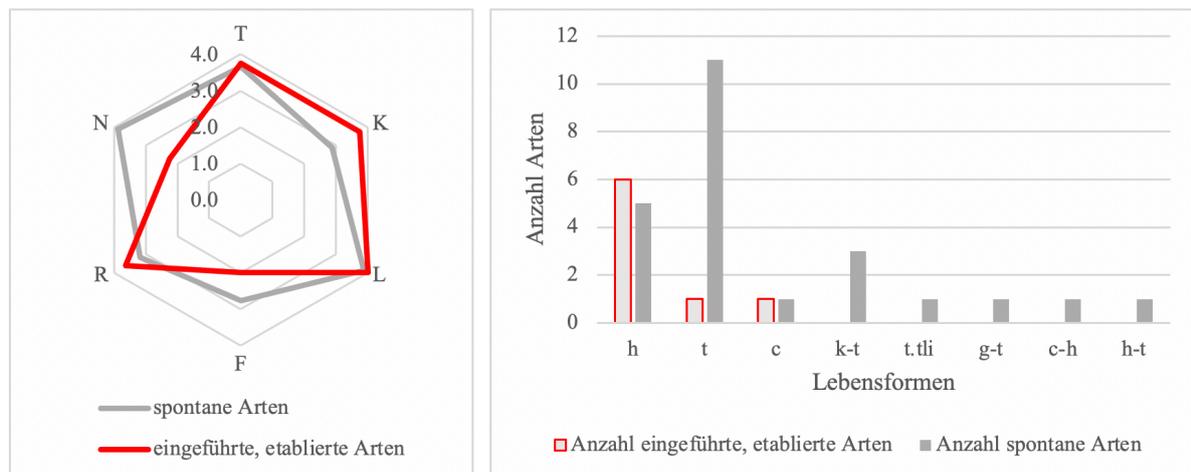


Abbildung 25. Landolt's Ökologische Zeigerwerte (links) und Lebensformen (rechts) für die beiden vorhandenen Gruppen der eingeführten, etablierte Arten und spontane Arten.

4 DISKUSSION

4.1 BODENSTRUKTUR UND BODENTEXTUR

Wasser- und Lufthaushalt

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die WKmax aller Test-, Kontrollvarianten und Ausgangssubstrate die Richtwerte des FLL erfüllen. Dabei war der Wasserrückhalt der Samples mit BK-Zuschlag und Wollschicht gegenüber den Kontrollen ohne BK und den Samples ohne SW erhöht. Gleichzeitig waren die Volumengewichte bei Proben mit Wolle und Biokohle reduziert, was den positiven Effekt von SW und BK auf die Leichtigkeit des Substrates aufzeigt.

Die Ergebnisse zum Lufthaushalt sind zwar unterschätzt, bei einem internen Vergleich der Resultate ist dennoch die positive Wirkung von Pflanzenkohle und Wolle auf den Lufthaushalt ersichtlich. Zudem lag der Volumenanteil an luftführenden Poren für alle Samples mit Wollzuschlag trotz reduzierter Kornfraktion innerhalb des Anforderungsbereichs. Andere Studien konnten bereits darlegen, wie durch die verbesserte Wasseraufnahmekapazität der Wolle auch die Porosität verbessert wird (Kadam et al., 2014). Böden mit guter Struktur und Porosität sind massgebend für die hydraulische Leitfähigkeit sowie für die Bewegung und Speicherung von Wasser und Nährstoffen im Bodenprofil und damit förderlich für das Wachstum der Wurzelsysteme (Toková et al., 2020). Die Abb.25 zeigt die Durchwurzelung von *Chenopodium album* und *Loilum perenne* auf dem biokohle- und wollhaltigen Wachstumsmedium.

Die Hypothesen der Tf 1 und Tf 2 konnten somit bestätigt werden. Die pyrolysierte Biomasse sowie die Schafswolle hatten einen positiven Effekt auf die Bodenstruktur, was sekundär förderlich für das Pflanzenwachstum ist. Die Vorbehandlung oder Schichtung der Stoffe spielte keine Rolle.



Abbildung 26. Das Bild zeigt den Zustand der Rhizosphäre im wolle- und biokohlehaltigen Wachstumsmedium sowie die darin wurzelnden Pflanzen. Links: *Chenopodium album* nutzt die Schafswolle direkt als Nährboden, rechts: Die Porosität des Substrates fördert die Durchwurzelung von *Loilum perenne* (Fotos: C. Winter, 2021)

Mineralisches Gerüst

Im Hinblick auf die Korngrößenverteilung lagen alle Test- und Kontrollvarianten mehrheitlich im Anforderungsbereich (Abweichungen gab es bei grosser Gesteinsfraktion $\geq 10\text{cm}$). Somit wurden die Hypothesen der Tf4 bestätigt. Durch die Probennahme wurde ein methodischer Fortschritt erzielt, was sich in der verbesserten WKmax und einer optimierten Korngrößenverteilung zeigte. Inwiefern die Separierung von Wolle und Feinanteil in längeren Untersuchungsperioden möglich sein wird und welche Adaptionen für das methodische Vorgehen notwendig würden, wenn die Schafswolle weiteren Zersetzungsprozessen unterliegt, muss weiter erforscht werden. Das AS3 ohne Zugabe von BK zeigte die grösste Abweichung vom Anforderungsbereich, was auf die Verbesserung der Bodentextur durch den BK-Zuschlag zurückzuführen ist.

Laut den deutschen Richtlinien (FLL, 2018) und dem VDLUFA-Methodenhandbuch ("VDLUFA C 2.0", 2002), bestimmt die Partikelzusammensetzung vorwiegend die mechanischen Eigenschaften von Dachsubstraten, primär also die Struktur- und Lagerungsstabilität, welche sich auf die Verteilung von Hohlräumen in der Bodenmatrix auswirkt und sekundär den Wasser- und Lufthaushalt steuert.

Die ökologische Konsequenz des verwendeten Gesteinsmaterials soll jedoch umfassender betrachtet werden und bei der Wahl des mineralischen Gerüsts sollen nicht nur die Kennwerte bestehender Richtlinien berücksichtigt werden. Catalano et al. (2018) haben in ihrer Studie aufgezeigt, dass unterschiedliche Dachbegrünungsrichtlinien (z.B auch FLL, 2018) zwar bis zu einem gewissen Grad biodiversitätsbezogene Aspekte einbeziehen, vertiefen dies jedoch nicht in Bezug auf die Zusammensetzung des Kultursubstrats (Materialien, Korngrösse oder Dicke).

Nebst den chemisch-physikalischen Prozessen muss also zwingend der Einfluss des mineralischen Gerüsts auch auf die Entwicklung und die Ansiedlung von Arten berücksichtigt werden. In der Studie von A. J. Bates et al. (2013) wurde gezeigt, dass Mikro-Habitats, welche die beste Kombination aus floristischem und faunistischem Artenreichtum, Deckung und Anzahl der Arten aufwies, durch ein bimodale anorganische Komponenten charakterisiert war, welche aus etwa 15 % Sand und 75 % Kiesel- und Pflastersteinen bestand. Durch das Vorhandensein grösserer Gesteine soll laut A. J. Bates et al. (2013) zum einen das Überwuchern einer Vegetationsschicht verhindert werden, wobei offene Flächen die Entstehung von Kleinhabitats fördert. Des Weiteren ist eine grobe Gesteinsfraktion und somit eine dickere Substratschicht wesentlich bei der Bildung von Wasserreserven und Rückzugsmöglichkeiten (A. J. Bates et al., 2013; Brenneisen, 2003).

Die der Wahl des Industriebeiproduktes muss deshalb in künftigen Studien zwingend in dessen Wirkung auf die Bodenfauna untersucht werden.

Feinboden

Zwar ist aufgrund des Vergleichs der Testvarianten mit den Ausgangsubstraten von einem leichten Verlust des Feinanteils ($<45\mu\text{m}$) auszugehen, was sich auch in einer leicht verminderten WK_{max} zeigte. Die kleinste Partikelfraktion ($\leq 0.063\text{ mm}$) entspricht dennoch bei allen Test- und Kontrollvarianten den Anforderungen des FLL und es ist ein leicht erhöhter Anteil an Schluff und Ton bei den Varianten mit BK ersichtlich. Der Feinboden stellt die Grösse der reagierenden Mineraloberflächen im Boden dar ("VDLUFA C 2.0", 2002), was zeigt, dass sich Biokohle positiv auf die Feinstoffspeicherung auswirkt.

4.2 NÄHRSTOFFANALYSEN

4.2.1 Der Einfluss von Biokohle auf die chemischen Prozesse im Substrat

Pflanzenverfügbare Nährstoffe

Das Vorhandensein von aktivierter BK^+ in den Parzellen hat die Konzentration von leicht löslichen, pflanzenverfügbaren Nährstoffen begünstigt. Dies weist darauf hin, dass ein grosser Gehalt der Nährstoffbevorratung nebst der Wolle aus der aufgeladenen BK mobilisiert werden kann. Dies deckt sich mit anderen Studien, bei denen die Verfügbarkeit von Nährsalzen durch die Co-Kompostierung gegenüber reiner Pflanzenkohle und Varianten ohne Biokohle deutlich erhöht waren (Ahmad et al., 2018; Teodoro et al., 2020). BK^+ fördert somit ein Milieu, welches von den meisten Pflanzen favorisiert wird.

Beim Magnesium blieben die Konzentrationen an pflanzenverfügbaren Elementen in den AS, in welchen keine Zersetzungsprozesse von Wolle stattgefunden haben sowie in den Testvarianten mit Wolle etwa gleich hoch. Gleichzeitig deckt sich der Mg-Gehalt mit den in der Vorstudie verwendeten Testvarianten ohne Wolle, was einen Hinweis darauf gibt, dass der Ursprung der Mg- Vorräte teilweise aus dem mineralischen Gerüst stammen und durch Verwitterungsprozesse ans Substrat abgeben werden.

Auswaschungssignale

Gleichzeitig waren aber bei den Varianten mit Co-kompostierter BK die Sickerwassersignale (gemessen an der Gesamtmenge der Ionen und der löslichen Salze) gleich hoch wie bei den Kontrollen ohne BK. Die Retentionswirkung wurde somit nur bei ungeladener BK ersichtlich. Nicht kompostierte, ungeladene Biokohle BK^- entfaltet das Potenzial die Na, NH_4 , K, Mg, Cl, NO_3 und SO_4 -Konzentrationen sowie die elektrische Leitfähigkeit, welche als Gesamtwert aller Mineralien und Salze betrachtet werden kann, signifikant zu reduzieren. Eine deutliche Retentionswirkung von BK, unabhängig von ihrer Ladung, war bei NO_3 sichtbar. Obwohl die Vorräte innerhalb der Testvarianten wenig variierten, war die Gesamtionenverfrachtung von Nitrat bei den Testvarianten mit Biokohle gegenüber den Kontrollen ohne BK deutlich reduziert

Die pflanzenverfügbaren Mg- Elemente übersteigen zwar die Richtwerte bei BK⁺ -Varianten, es sind aber insgesamt kaum Verluste über das Sickerwasser zu verzeichnen und das Signal bleibt über die Zeit sehr stabil, dies obschon Mg als mobiles Kation, in Düngeverfahren häufig in hohen Konzentrationen ins Sickerwasser abgegeben wird (Lehmann & Schroth, 2003). Die Vorstudie mit Innosuisse hat zwar gezeigt, dass die Beigabe von BK eine Reduzierung von Mg-Signalen im Sickerwasser bewirkt hatte, in der vorliegenden Untersuchung verlief die Auswaschung aber entsprechend der Verfügbarkeit, womit keine Retentionswirkung von BK festgestellt werden konnte.

Mineralisch gebundener Kohlenstoff und organische Substanz

In verschiedenen Studien wurde beschrieben, dass die poröse Struktur der BK den Gehalt an mikrobieller Biomasse und somit den organischen Gesamtkohlenstoff fördert (Chen et al., 2018b; Zavalloni et al., 2011). Gleichzeitig ist die organische Substanz von zentraler Bedeutung für die Ausbildung einer stabilen, aggregierten Bodenstruktur und letztendlich wesentlich bei der C-Sequestrierung im Boden (Teodoro et al., 2020). Die organische Substanz des Bodens ist aufgrund ihrer grossen Oberfläche ausserdem ein wichtiger Sorbent für organische und anorganische Stoffe und kann zu einer Erhöhung der Kationenaustauschkapazität führen (Blume et al., 2010). Bei Variante 2 mit BK⁺ und SW⁺, ist aufgrund der erhöhten organischen Substanz, welche als Energielieferanten für Bodenorganismen dient, von einer erhöhten mikrobiellen Aktivität auszugehen. Der Spitzenwert des Corg für diese Varianten gibt Hinweise über den im System verbleibenden, nicht mineralisierte Anteil an Kohlenstoff, welcher in der organischen Bodensubstanz stabilisiert wurde.

4.2.1 Der Einfluss von Schafswolle auf die chemischen Prozesse im Substrat

Im Hinblick auf mögliche Umweltbelastungen durch starke Auswaschung ist laut FLL (2018) von hohen Nährstoffbevorratungen auf Dachsubstraten abzusehen. Das FLL empfiehlt daher ergänzende Nährstoffversorgung durch Düngung erst nach der Begrünung vorzunehmen (FLL, 2018). Die Wahl von organischen Nährstoffzusätzen auf Gründächern ist aufgrund der Schadstoffreduzierung naheliegend. Gleichzeitig ist die Elementzusammensetzung im Sickerwasser bei organischen Düngern, aufgrund komplexer Interaktionen mit einer entstehenden Vegetationsschicht schwieriger vorherzusehen als von anorganischen Düngern (Koch et al., 2015).

Trotz dem Einbau von nährstoffreicher Schafswolle in allen Parzellen und Analysen, welche der Etablierung einer Vegetationsschicht vorausgingen und somit die Aufnahme der Pflanzen nur teilweise berücksichtigen, entsprach die Menge an pflanzenverfügbarem Kalium, Phosphor und N-Nitrat den vorgegebenen Richtwerten.

Einfluss der Schichtung

Zwar war bei der mittleren Schichtung (SW^m), die über den gesamten Zeitraum gemittelte Ionenkonzentration (aus der Summe aller Ionen) sowie die mittlere elektrische Leitfähigkeit im Sickerwasser geringer als bei den Parzellen, welche die Schafswolle im Unterbau eingebaut hatten. Dieser Unterschied konnte aufgrund der grossen Streuung der Daten nicht nachgewiesen werden. Dennoch gab es weitere Hinweise darauf, dass im Hinblick auf eine Schadstoffreduzierung eine mittlere Schichtung gegenüber SW^u zu bevorzugen ist. Bei einem Vergleich zu den Schichtungsmethoden der Vorstudie (V7 mit SW^m und Cv5 mit SW^u) zeigte die neuen Schichtungsvariante eine stark reduzierende Wirkung auf die Sickerwassersignale. Leicht alternierende Signale, welche dem Verlauf der Schichtung folgen, konnten zudem für Mg, P und NO₃ sowie für die Gesamtionenverfrachtung beobachtet werden, wobei die Parzellen mit mittlerem Schafswolleinbau (SW^m) gegenüber SW^u reduzierte Sickerwasserkonzentrationen aufzeigten.

Einfluss der Vorbehandlung

Insgesamt war die austretende Sickerwasserkonzentration der Gesamtionenverfrachtung sowie von dem gesamten Salzgehalt (EC) bei vorbehandelter SW⁺ geringer als bei SW⁻. Von den acht geprüften Anionen und Kationen, zeigte sich jedoch nur in einem Datensatz eine signifikant wahrscheinliche Abhängigkeit von der Sickerwasserkonzentration zum Behandlungseffekt. Bei Varianten mit unbehandelter SW konnten signifikant höhere Kaliumkonzentrationen im Sickerwasser nachgewiesen werden als bei Parzellen mit gewaschener Wolle. Dies ist auf den starken Verlust der löslichen K-Ionen beim Waschvorgang zurückzuführen.

Die Hypothesen, dass durch die Vorbehandlung der Schafswolle (SW⁺) das Auswaschungsrisiko minimiert werden kann, konnte für Kalium nachgewiesen werden. Für Nitrat zeigte sich ein konträres Muster (siehe nächster Abschnitt).

Mögliche Pfade von NO₃

Der Vergleich mit der Kontrollvariante der Vorstudie (Cv₄), in welcher keine Schafswolle verwendet wurde, zeigte erheblich reduzierte Konzentrationen von NO₃, welche als Folge des fehlenden SW-Einbaus verstanden werden. Für N-NO₃ wurde ausserdem ein stärkerer Kontrast zwischen den Testvarianten mit Wolle zu den Ausgangssubstraten ohne Wolle festgestellt, was einen weiteren Hinweis auf den grossen N-Vorrat in der SW gibt.

Dieses Resultat deckt sich mit verschiedenen Kultivierungsstudien, bei welchen durch die Zugabe von Wolle, insbesondere die Konzentration der N-Spezies NO₃, massgeblich erhöht wurde (Górecki & Górecki, 2019; Koch et al., 2015; Zheljaskov et al., 2009).

Die Pfade der N- Elemente können aus den resultierenden Schwankungen im Sickerwasser vermutet werden. Da aufgrund der guten Belüftung nicht von Denitrifizierungsprozessen ausgegangen wird und keine Nitrifikationsumwandlung in den Ammoniumgehalten sichtbar wurde, ist eine Reduktion von NO₃

im Sickerwasser einzig durch die Aufnahme der Pflanzen, respektive der Mineraloberflächen des Substrates erklärbar.

Im Gegensatz zu K wurde aus der Waschanalyse sichtbar, dass N in stabilen Mengen abgegeben wurde. Gleichzeitig verlief bei der unbehandelten SW das NO₃-Signal im Sickerwasser insgesamt moderater. Die Autoren Koch et al. (2015) zeigten in ihrer Studie, dass aufgrund der Zersetzungsrückstand von Wolle ein verzögertes N-Signal zu erwarten ist. Inwiefern sich die von Broda et al. (2016) beschriebene resistente Cuticula, welche die Faserstruktur der Wolle umschliesst und den biologischen Abbau hemmt, durch die Wollwäsche verändert und somit die Nitratabgabe ans umliegende Substrat begünstigt, gilt es weiter zu untersuchen.

Abbauraten von Schafswolle

Die Resultate des Litter Bag Experiments zeigen zwar aufgrund des Massenverlustes, dass die Abbauraten bei SW⁻ schneller verlief. Aufgrund der geringeren Mobilisierung von Nitrat aus den SW⁻ - Parzellen soll dieses Ergebnis allerdings mit Vorsicht betrachtet werden. Im Hinblick auf die grosse Standardabweichung ($\pm 10\%$), die geringe Anzahl an Replikaten sowie methodischen Lücken in der Durchführung des Experimentes mit Schafswolle, soll in zukünftigen Studien weiter untersucht werden, wie sich der Waschprozess auf die Struktur der Wolle und letztendlich auf den Abbaubarkeit des Materials auswirkt.

4.2.2 Wechselwirkung von Biokohle und Schafswolle

Kompositionen mit Co-kompostierter Biokohle

Insgesamt zeigten die Varianten V5 und V6, welche mit Co-kompostierter BK⁺ und ungewaschener SW⁻ angereichert waren, die höchsten Gehalte an verfügbaren Nährstoffen, gleichzeitig wurden dort aber auch die höchsten Auswaschungssignale sowie grosse Schwankungen in den Sickerwassersignalen gemessen, was vor allem auf den grossen Verlust von Kalium bei den SW⁻ - Parzellen zurückzuführen ist.

BK⁺ ist zwar kein Düngemittel im eigentlichen Sinne, durch die Aufladung mit Nährstoffen im Vorfeld wird aber eine komplexe, nährstoffreiche organische Beschichtung gebildet, welche die äusseren und inneren (Poren-) Oberflächen der Biokohlepartikel mit Nährsalzen bedeckt (Hagemann et al., 2017; Ippolito et al., 2015). Bei zusätzlicher Zugabe von Mineralstoffen über den organischen Dünger, scheint aufgrund der Sickerwassersignale die Aufnahmekapazität der Pflanzenkohle übersättigt. Dies gibt ein Hinweis darauf, dass sich eine bimodale organische Komponente aus ungewaschener Schafswolle und geladener Biokohle nicht für Dachgartensubstrat eignet.

Nebst dessen zeigte die Komposition aus BK⁺ und SW⁺ aufgrund des hohen Corg und des C-Gesamtgehaltes ein erhöhtes Potenzial für die C-Sequestrierung. So wurde auch in einer Studie von Ye et al. (2019) nachgewiesen, dass die Aufladung und Aktivierung von Biokohle die Anzahl der

Bindungsstellen gegenüber herkömmlicher BK erhöht und damit die Kohlenstoffspeicherungskapazität weiter aufstockt.

Inwiefern die Verbindung aus BK⁺ und SW⁺ für andere Begrünungszwecke im urbanen Raum genutzt werden kann, um dort zur Klimaneutralität beizutragen, muss weiter überprüft werden.

Kompositionen mit ungeladener Biokohle

Die Ziele der organischen Düngung auf extensiven Gründächern ist die Schaffung optimaler Bedingungen für das Wachstum einer angestrebten Vegetationsgemeinschaft sowie eine nachhaltige Verfügbarkeit und eine moderate Mobilisierung von Mineralstoffen sicherzustellen. Dabei gilt es zu beachten, dass sich während der Entwicklung der Vegetation die Gehalte der verschiedenen Nährstoffe verändern und der Gesamtgehalt an Nährstoffen im Kultursubstrat kontinuierlich abnimmt, während die Pflanze an Biomasse zulegt. Abschliessende Analyseergebnisse lassen sich deshalb meist nur in langjährigen Feldstudien ermitteln (Flisch et al., 2017b). Dennoch zeigte der aktuelle Stand der Untersuchung, dass durch die Zusammensetzung aus ungeladener BK⁻ mit SW⁺ die moderatsten Düngezustände angestrebt werden konnten, denn die Varianten V3 und V4 mit ungeladener Pflanzenkohle und gewaschener SW sowie die V7 (BK⁻, SW⁻) zeigten die reduziertesten Sickerwassersignale sowie auch moderatere Kaliumverfrachtungen. Die Nährstoffverfügbarkeit war zwar ebenfalls leicht reduziert, die vermehrte Ansiedlung von Ruderalstrategen auf diesen Parzellen zeigt jedoch, dass der Vorrat für die Ansiedlung der angesäten Pflanzenspezies zumindest in der ersten Vegetationsperiode, nachweislich vorhanden war. Daraus wird die Schlussfolgerung gezogen, dass sich die Komposition aus gewaschener Wolle mit ungeladener BK eignet, da so nur geringe Nährstoffvorräte gleichzeitig mobilisiert werden und dass die Verwendung von ungewaschener SW zwingend mit ungeladener BK erfolgen muss. Inwiefern sich die Vorräte und Reservenährstoffe in weiteren Vegetationszyklen verschieben, muss weiter untersucht werden.

Die Hypothesen, dass BK⁺ im Gegensatz zu BK⁻ einen positiven Effekt auf den Nährstoffrückhalt hat, konnte nicht bestätigt werden. Inwiefern sich Co-kompostierte BK als singuläre, organische Komponente von Dachkultursubstraten eignet, welches den Anforderungen nach N-Verfügbarkeit, N-Retention und C-Sequestration gleichermassen gerecht wird, muss unbedingt in weiteren Studien geklärt werden.

Gleichzeitig gilt es bei der Verfahrenstechnik im Kompostierungsprozess von Biokohle weitere Fortschritte zu erzielen, was ein verbessertes Verständnis auf spektrometrischem Massstab voraussetzt. Inwiefern sich der Aufladungsprozess auf die Biokohle und deren molekulare Bindungsstruktur auswirkt, welche letztendlich für die Nährstoffretention zuständig ist, bleibt weiterhin Gegenstand vieler Studien (Hagemann et al., 2017; Ippolito et al., 2015; Joseph et al., 2018).

4.3 VEGETATION

4.3.1 Gefundene Arten

Alle angesäten Arten konnten sich im ersten Vegetationszyklus etablieren. Gleichzeitig haben sich auch viele spontane, häufig einjährige und mehrheitlich ruderales Arten auf den Kleindächern entfaltet. Die Lebensformen der nicht eingeführten Arten reichte über Geophyten, krautige Pflanzen sowie mehrjährige Arten. Am häufigsten waren Therophyten (einjährige), deren Ursprung teilweise auf Samenrückstände zurückzuführen ist, welche über das mineralische Gerüst eingebracht wurden (z. B. *Chenopodium sp.*) und deren Nährstoff- und Feuchtezahlen gegenüber der Indikatorenwerte der angesäten Arten leicht erhöht waren. Betreffend der Konkurrenzstrategie, waren ausserdem die ruderalen Zeigerarten am dominantesten. Grundsätzlich entspricht dies den Erwartungen. In der ersten Vegetationsperiode etablieren sich vorwiegend einjährige und ruderales Arten aufgrund deren Ausbreitungsformen (Windausbreitung, Fähigkeit zur Ausbildung persistenter Samenbanken) und schnellen Reproduktionsraten sowie deren Ansiedlung auf konkurrenzarmen Standorten (Thommen, 1986). Nebst der eingeführten Art *Sedum rupestre* hat sich ausserdem keine weitere Stresszeigerart etabliert und die einzige intermediäre css-Art, *Sanguisorba minor*, welche zwar ebenfalls eingeführt wurde, konnte sich kaum durchsetzen. Dies gibt einen Hinweis darauf, dass genügend Nährstoff- und Wasservorräte vorhanden waren.

4.3.2 Leistungsfähigkeit der Kultursubstrate

Um Annahmen über die Leistungsfähigkeit des Substrates und den langfristigen Vegetationserfolg zu generieren, sind Beschreibungen, welche nur den Bedeckungsgrad innerhalb einer Vegetationsperiode berücksichtigen, zu einseitig. Aufgrund der kurzen Untersuchungsdauer fehlen jedoch Analysen über die Etablierung der Arten in den Folgejahren und Aussagen über die Bewältigung von heisseren Sommermonaten sowie über potenzielle Veränderungen der Nährstoffverfügbarkeit. Trotz fehlenden Untersuchungen über weitere Vegetationszyklen sollen im folgenden einige Hypothesen zur Vegetationsentwicklung aufgrund der Studie von Thommen (1986), welcher die Sukzessionsdynamik auf extensiven Gründächern analysiert hat, im Zusammenhang mit den empirisch beobachteten Pflanzenarten erfolgen, was wiederum Rückschlüsse auf die Standorteigenschaften der getesteten Kultursubstrate erlauben soll.

Der Einfluss der Nährstoffverfügbarkeit auf die Sukzessionsdynamik

Durch die grössere N-Verfügbarkeit, welche aufgrund des geringen Alters und der organischen Düngekomponente auf den Kleindächern zu erwarten war, kann laut Thommen (1986) zu Beginn von einer vermehrt ruderalen, unstablen Artenzusammensetzung ausgegangen werden. Diese werden mit der Zeit aber durch mehrjährige, konkurrenzstärkere Taxa abgetauscht, welche eine stabile Pflanzengesellschaft bilden werden.

Obschon insgesamt die meisten unterschiedlichen Arten den R-Strategen zugeordnet wurden, dominierten bei den Testvarianten die intermediären Formen, wie crs- und ccr Strategen, wobei es im Hinblick auf die Schichtung einige Unterschiede gab. Insgesamt lässt sich daraus schliessen, dass die Varianten mit Biokohle und SW^m durch eine verbesserte Nährstoffverfügbarkeit für eine schnelle Etablierung von konkurrenzstärkeren Spezies förderlich war, was wiederum zu einer schnelleren Verdrängung, respektive einer geringeren Etablierung der R-Strategen geführt hat.

Der Deckungsgrad an Ruderalstrategen insgesamt sowie die Deckung der trockenliebenden Zeigerart *Papaver rhoeas* war zwar bei Parzellen mit BK⁻ deutlich erhöht, dieser Unterschied wird aber wesentlich auf den Faktor der Schichtung zurückgeführt. Die erhöhte Nährstoffverfügbarkeit bei SW^m-Parzellen könnte in Zukunft eine schnellere Etablierung von kompetitiven, stabileren Artengemeinschaften auf diesen Parzellen fördern, wie sich im Erfolg der Übergangsformen (ccr, csr) zeigte. Der N-Indikator verwies indes auf einen grösseren Vorrat an Nährsalzen bei den Parzellen mit geladener BK⁺, was in Zukunft ebenfalls eine raschere Verschiebung von einjährigen, ruderalen Arten zu vermehrt kompetitiven Taxa bewirken könnte.

Laut Thommen (1986) ist somit das Alter der Gründächer und die damit verbundene Nitratverfügbarkeit eine der wichtigsten Steuergrössen für die Verschiebung der Pflanzengemeinschaften. Im Hinblick auf die Stabilität der Pflanzengesellschaften könnten die Testvarianten im Gegensatz zu den Kontrollen durch die Beigabe von nährstoffreicher BK⁺ also den Sukzessionsprozess beschleunigen. Inwiefern sich die Nitratverfügbarkeit aber über die Zeit verändert, wird massgeblich von der Zersetzung der organischen Düngerkomponente abhängen.

Der Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf die Sukzessionsdynamik

Thommen (1986) zeigte auf, dass nebst dem Alter der Dächer und der damit verbundenen N-Verfügbarkeit die klimatischen Gegebenheiten massgeblich bei der Etablierung der Pflanzengesellschaften beteiligt sind. Laut Thommen (1986) ist die Entwicklung dabei am stärksten von der Regelmässigkeit der Niederschläge im Hochsommer gekennzeichnet. Sekundär ist die Substratdicke und -Zusammensetzung ein wesentlicher Faktor, da diese ergänzend die Wasserfügbarkeit steuern (Thommen, 1986). Die höchste Artenzahl insgesamt war bei den beiden Kontrollen C1 und C2 ohne Biokohle vorhanden. Dies kann auf den erhöhten Feuchteindikator dieser Parzellen zurückgeführt werden, welcher förderlich für die Etablierung vieler Arten ist. Umgekehrt hatten die V5 und V7 mit BK und mittlerem SW- Einbau die niedrigsten F-Werte, simultan war die Bedeckung der stresstoleranten Spezies *Sedum rupestre* auf diesen Parzellen leicht erhöht.

Inwiefern sich der Wasserhaushalt der Kultursubstrate in den kommenden Jahren verändern und allenfalls eine vermehrt *Sedum*-dominierende Pflanzengesellschaften fördern wird, ist wesentlich davon abhängig wie sich die klimatischen Gegebenheiten wandeln werden. Gerade im Schweizer Voralpenraum sind im Hinblick auf die Niederschlagsmengen und jahreszeitlichen Schwankungen aufgrund des starken CO²-Anstieges in diesem Gebiet grosse Unsicherheiten zu erwarten (Gobiet & Kotlarski, 2020). Die geringe Aufbaudicke der künstlichen Dachstandorte machen diesen Lebensraum besonders sensibel gegenüber extremen Hitze- oder Regenevents. Die Speicherkapazität, respektive Drainagefunktion von Schafswolle und Biokohle werden daher entscheidend zur Vegetationsdynamik beitragen.

Obschon zwar die Wasserverfügbarkeit auf den extensiven Kleindächern bedingt durch die geringe Aufbaudicke analog zu ökologischen, natürlichen Standorten (z. B. Mesobromion), eher gering einzuschätzen ist, kann anders als bei natürlichen, primären Sukzessionsgesellschaften auf den Kleindächern zu Beginn von einer grösseren Menge an austauschbareren Kationen und einer grösseren Nährstoffverfügbarkeit ausgegangen werden (Thommen, 1986). Diese Tatsache machen die Entwicklungsdynamiken dieser künstlich, angelegten Ökosysteme äusserst komplex. Für ein besseres Verständnis über die Sukzessionsprozesse muss daher die Überwachung auf weitere Vegetationsperioden ausgeweitet werden.

5 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Hypothesen betreffend Bodenstruktur konnten bestätigt werden. Der Zusatz von Biokohle sowie der Einbau von Schafswolle zeigte durchgehend einen positiven Effekt auf die betreffenden Untersuchungsgrössen. Ausserdem wurde der angestrebte, methodische Fortschritt bei der Probenahme von einschichten Substraten mit organischem Schichteinbau erzielt, was sich in verschiedenen bodenphysikalischen Parametern zeigte.

Die leichte Abweichung der Korngrössenverteilung von den FLL-Richtwerten aufgrund grösserer Gesteinsfraktionen, was auf das verwendete, mineralische Gerüst zurückzuführen ist, kann aufgrund anderer ökologischer Zielsetzungen akzeptiert werden. Zum einen wird das Erntebeiprodukt dem Nachhaltigkeits- und Lokalitätsanspruch gerecht, daneben gibt es viele Hinweise darauf, dass sich die Steine positiv auf die Artenvielfalt von extensiven Gründächern auswirkt. Der Effekt von der gewählten strukturgebenden Komponente auf die Bildung von Mikrohabitaten soll in künftigen Studien weiter untersucht werden und soll vermehrt auch in internationalen Richtlinien berücksichtigt werden.

Im Hinblick auf die Nährstoffversorgung des Substrates konnte die Hypothese, dass Co-kompostierte Biokohle gegenüber ungeladener Pflanzenkohle eine stärkere Retentionswirkung zeigt, nicht bestätigt werden. Die Anreicherung der bereits nährstoffgeladenen BK mit einem organischen Dünger könnte eine Übersättigung der Ionenkapazität des Substrates verursachen und muss daher überdacht werden, insbesondere, wenn mit einer verzögerten Pflanzenansaat gerechnet wird. Somit ist eine bimodale organische Gründachkomponente aus SW⁻ und BK⁺ zu verwerfen. Dafür war in der Komposition aus BK⁺ und SW⁺ ein verstärktes Potenzial für die C-Sequestrierung erkennbar. Für Begrünungszwecke im urbanen Raum, bei welchen die Umweltrisiken durch Auswaschung weniger sensibel sind, könnte daher das Zusammenführen von Co-kompostierte Biokohle mit Schafswolle eine optimale Nährstoffverfügbarkeit generieren und gleichzeitig einen Beitrag zur Klimaneutralität leisten.

Inwiefern sich ausserdem Co-kompostierte BK⁺ als unimodale, organische Komponente von Dachkultursubstraten eignet, welches den Anforderungen nach N-Verfügbarkeit, N-Retention und C-Sequestration gleichermaßen gerecht wird, muss zwingend in weiteren Studien geklärt werden.

Eine verbesserte Rückhaltekapazität auf Mineralstoffe konnte im Allgemeinen in Parzellen mit ungeladener BK festgestellt werden. Daraus wird die Schlussfolgerung gezogen, dass sich die Mischung aus ungeladener BK mit gewaschener Wolle eignet, da nur geringe Nährstoffvorräte gleichzeitig mobilisiert und Verfügbar gemacht werden. Simultan soll die Verwendung von ungewaschener SW ausschliesslich mit ungeladener BK erfolgen.

In Bezug auf die Schichtung und Vorbehandlung von Schafswolle konnten die Hypothesen nur teilweise bestätigt werden. Eine Reduktion des Auswaschungsrisikos durch die Wollwäsche wurde nur für das

sehr lösliche Kalium-Ion nachgewiesen. Wolle erwies sich aber insgesamt als ein wichtiger Stickstofflieferant, wobei das darin enthaltene Nitrat aufgrund der geringen Abbaubarkeit von Schafswolle eine moderate Mobilisierung aufzeigte, was in einem nachhaltig verfügbaren Nährstoffvorrat resultieren könnte. Inwiefern sich die resistente Faserstruktur der Wolle durch die Wollwäsche verändert und somit die Ionenabgabe ans umliegende Substrat begünstigt, gilt es weiter zu untersuchen.

Im Hinblick auf die Ionenverfrachtung vom Substrat ins Sickerwasser, könnte eine mittlere Einbaulokalität von Wolle bevorzugt werden. Zudem gab es Hinweise darauf, dass durch die verbesserte Nährstoffverfügbarkeit bei den Parzellen mit mittlerem SW-Einbau, eine schnellere Ansiedlung von konkurrenzstärkeren Taxa erfolgen konnte, was zu einer schnelleren Etablierung einer stabilen Artenzusammensetzung führen kann.

Um Auswaschungsrisiken möglichst gering zu halten, werden bei der zukünftigen Gestaltung von Gründächern die Varianten V1 (BK⁺, SW⁺, SW^m), V3 (BK⁻, SW⁺, SW^m) und V7 (BK⁻, SW⁻, SW^m) empfohlen. Weiter soll auch eine Variation aus Feldsteinen in Kombination mit herkömmlichen Dachsubstraten sowie die bimodalen, organischen Komponenten aus Biokohle und Schafswolle, in den bereits aufgezeigten, interagierenden Behandlungsvarianten innerhalb einer strukturreichen, mosaikartigen Substratlandschaft Verwendung finden.

Damit können die vielfältige, ökologische Zieleetzungen (Nachhaltigkeit der Baustoffe, Förderung der Artenvielfalt, C-Sequestrierung, Schadstoffreduzierung, langanhaltender Vegetationserfolg), ökonomische Bestrebungen (Kostenreduktion, geringer Pflegeaufwand) sowie sozialen Bedürfnisse (anhaltende Bereitstellung von Ökosystemleistungen) von Gründächer weiter optimiert werden.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdallah, A., Ugolini, F., Baronti, S., Maienza, A., Camilli, F., Bonora, L., Martelli, F., Primicerio, J., & Ungaro, F. (2019a). The potential of recycling wool residues as an amendment for enhancing the physical and hydraulic properties of a sandy loam soil. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8(1), 131–143. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-0283-5>
- Abdallah, A., Ugolini, F., Baronti, S., Maienza, A., Ungaro, F., & Camilli, F. (2019b). Assessment of Two Sheep Wool Residues from Textile Industry as Organic Fertilizer in Sunflower and Maize Cultivation. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(4), 793–807. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00079-y>
- Ahmad, M., Usman, A. R., Al-Faraj, A., Ahmad, M., Sallam, A., & Al-Wabel, M. I. (2018). Phosphorus-loaded biochar changes soil heavy metals availability and uptake potential of maize (*Zea mays* L.) plants. *Chemosphere*, 194(März), 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.156>
- Aitkenhead-Peterson, J. A., Dvorak, B. D., Volder, A., & Stanley, N. C. (2011). Chemistry of growth medium and leachate from green roof systems in south-central Texas. *Urban Ecosystems*, 14(August), 17–33. <https://doi.org/10.1007/s11252-010-0137-4>
- Akther, M., He, J., Chu, A., Huang, J., & Van Duin, B. (2018). A Review of Green Roof Applications for Managing Urban Stormwater in Different Climatic Zones. *Sustainability*, 10(8), 2864. <https://doi.org/10.3390/su10082864>
- Azzi, E. S., Karlun, E., & Sundberg, C. (2019). Prospective life cycle assessment of large-scale biochar production and use for negative emissions in stockholm. *Environmental Science and Technology*, 53(14), 8466–8476. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01615>
- Bärlocher, F. (2005). Lead Mass Loss Estimated by Litter Bag Technique. In M. A. S. Graça, F. Bärlocher, & M. O. Gessner (Eds.), *Methods to Study Litter Decomposition: A Practical Guide* (pp. 37–41). Springer Netherlands.
- Bates, A. J., Sadler, J. P., & Mackay, R. (2013). Vegetation development over four years on two green roofs in the UK. *Urban Forestry and Urban Greening*, 12(1), 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.12.003>
- Bates, D. (2011). *Mixed models in R using the lme4 package Part 6: Nonlinear mixed models*.
- Beck, D. A., Johnson, G. R., & Spolek, G. A. (2011). Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 2111–2118. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.022>
- Berndtsson, J. C., Emilsson, T., & Bengtsson, L. (2006). The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of the Total Environment*, 355(1–3), 48–63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.035>
- Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., Thiele-Bruhn, S., & Welp, G. (2010). Organische Bodensubstanz. In *Lehrbuch der Bodenkunde* (pp. 51–81). Spektrum Akademischer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2251-4_3
- Bozorg, S., Lehvavirta, S., & Häkkinen, T. (2015). Life cycle assessment of layers of green roofs. *Journal of Cleaner Production*, 90, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.070>
- Braun-Blanquet, J. (1964). *Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde* (3rd ed.). Springer-Verlag.
- Brenneisen, S. (2003). *Ökologisches Ausgleichspotenzial von Extensiven Dachbegrünungen. Bedeutung der Ersatz-Ökotope für Arten- und Naturschutz und die Stadtentwicklung*. Universität Basel.
- Broda, J., Kobiela-Mendrek, K., Rom, M., Grzybowska-Pietras, J., Przybyło, S., & Laszczak, R. (2016). Biodegradation of wool used for the production of innovative geotextiles designed to erosion control. In R. Figueiro & S. Rana (Eds.), *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications* (Vol. 12, Issue November, pp. 351–361). RILEM Bookseries. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1_27
- Buffam, I., & Mitchell, M. E. (2015). Nutrient Cycling in Green Roof Ecosystems. In R. Sutton (Ed.), *Green Roof Ecosystems* (pp. 107–137). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14983-7_5

- Cao, C. T. N., Farrell, C., Kristiansen, P. E., & Rayner, J. P. (2014). Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants. *Ecological Engineering*, 71, 368–374. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.017>
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42(10), 1582–1591. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.004>
- Catalano, C., Brenneisen, S., Baumann, N., & Guarino, R. (2021). I tetti verdi di tipo estensivo: biodiversità ad alta quota [Extensive green roofs: biodiversity at high levels]. *Reticula*, 12, 1–10. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12938.18888>
- Catalano, C., Laudicina, V. A., Badalucco, L., & Guarino, R. (2018). Some European green roof norms and guidelines through the lens of biodiversity: Do ecoregions and plant traits also matter? *Ecological Engineering*, 115, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.01.006>
- Catalano, C., & Winter, C. (2020). *Biokohlesubstrat für Gründächer. Abschlussbericht zum Innovationsscheck im Auftrag von der RICOTER Erdaufbereitung AG*. Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften.
- Chen, H., Ma, J., Wang, X., Xu, P., Zheng, S., & Zhao, Y. (2018a). Effects of biochar and sludge on carbon storage of urban green roofs. *Forests*, 9(7), 413. <https://doi.org/10.3390/f9070413>
- Chen, H., Ma, J., Wei, J., Gong, X., Yu, X., Guo, H., & Zhao, Y. (2018b). Biochar increases plant growth and alters microbial communities via regulating the moisture and temperature of green roof substrates. *Science of the Total Environment*, 635, 333–342. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.127>
- Eidg. landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (Ed.). (1996a). AAE10-Ex: Extraktion mit Ammoniumacetat + EDTA (1:10). In *Schweizerische Referenzmethoden Band 1: Boden- und Substratuntersuchungen zur Düngeberatung (Acker-, Futter-Obst-, Wein und Gartenbau)* (p. 6356). Forschungsanstalt Agroscope ART/ACW.
- Eidg. landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (Ed.). (1996b). B-WHK: Bestimmung der maximalen Wasserkapazität. In *Schweizerische Referenzmethoden Band 2: Bodenuntersuchung zur Standort-Charakterisierung (Bodenphysikalische-, biologische und chemische Untersuchungen)* (p. 6356). Forschungsanstalt Agroscope ART/ACW.
- Eidg. landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (Ed.). (1996c). H2O10-Ex: Extraktion von P, K, Mg, Ca mit Wasser (1:10). In *Schweizerische Referenzmethoden Band 1: Boden- und Substratuntersuchungen zur Düngeberatung (Acker-, Futter-Obst-, Wein und Gartenbau)* (p. 6356). Forschungsanstalt Agroscope ART/ACW.
- Eidg. landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (Ed.). (1996d). H2OGH-Ex: Volumenextraktion mit Wasser (1:2). In *Schweizerische Referenzmethoden Band 1: Boden- und Substratuntersuchungen zur Düngeberatung (Acker-, Futter-Obst-, Wein und Gartenbau)* (p. 6356). Forschungsanstalt Agroscope ART/ACW.
- Eidg. landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (Ed.). (1996e). H2OSU-pH: pH-Wert im Volumenextrakt mit Wasser (1:1.5). In *Schweizerische Referenzmethoden Band 1: Boden- und Substratuntersuchungen zur Düngeberatung (Acker-, Futter-Obst-, Wein und Gartenbau)* (p. 6356). Forschungsanstalt Agroscope ART/ACW.
- Eidg. landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (Ed.). (1996f). H2OSU-Sal: Salzgehalt im Volumenextrakt (1:1.5). In *Schweizerische Referenzmethoden. Band 1: Boden- und Substratuntersuchungen zur Düngeberatung (Acker-, Futter-Obst-, Wein und Gartenbau)* (p. 6356). Forschungsanstalt Agroscope ART/ACW.
- Eksi, M., Sevgi, O., Akburak, S., Yurtseven, H., & Esin, İ. (2020). Assessment of recycled or locally available materials as green roof substrates. *Ecological Engineering*, 156(September), 105966. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105966>
- Fachstelle Bodenökologie (Ed.). (2013). *SOP-UII352a: Grobporen im Drucktopf* (p. 5). ZHAW.
- Flisch, R., Neuweiler, R., Kuster, T., Oberholzer, H., & Huguenin-Elie, O. (2017a). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD): Bodeneigenschaften und Bodenanalysen. *Agrarforschung Schweiz*, 8(6), 1–34.
- Flisch, René, Neuweiler, R., Kuster, T., Oberholzer, H., Huguenin-Elie, O., & Richner, W. (2017b). Die Nährstoffversorgung des Bodens. In *Bodeneigenschaften und Bodenanalysen* (p. 34). Agroscope.

- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau. (2018). *Dachbegrünungsrichtlinien Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen* (pp. 1–160).
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e. V. (FLL) (Ed.). (2018a). Bestimmung der maximalen Wasserkapazität. In *Dachbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen (FLL)* (p. 127).
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e. V. (FLL) (Ed.). (2018b). Bestimmung der Rohdichte (des Volumengewichts). In *Dachbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen (FLL)* (pp. 125–126).
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e. V. (FLL) (Ed.). (2018c). Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit. In *Dachbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen (FLL)* (p. 128).
- Ganser, G. H., & Hewett, P. (2010). An Accurate Substitution Method for Analyzing Censored Data. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 7, 233–244. <https://doi.org/10.1080/15459621003609713>
- Getter, K. L., Rowe, D. B., Robertson, G. P., Cregg, B. M., & Andresen, J. A. (2009). Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science and Technology*, 43(19), 7564–7570. <https://doi.org/10.1021/es901539x>
- Gobiet, A., & Kotlarski, S. (2020). Future Climate Change in the European Alps. In *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.767>
- Goldschmidt, A. M. (2018). *Biochar amendment of green roof substrate: Effect on vegetation, nutrient retention, and hydrologic performance* [University of Cincinnati]. <https://orcid.org/0000-0002-3723-6784>
- Górecki, R. S., & Górecki, M. T. (2019). Utilization of Waste Wool as Substrate Amendment in Pot Cultivation of Tomato, Sweet Pepper, and Eggplant. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19(5), 1083–1087. <http://www.pjoes.com/Utilization-of-Waste-Wool-as-Substrate-r-nAmendment-in-Pot-Cultivation-of-Tomato,88486,0,2.html>
- Hagemann, N., Joseph, S., Schmidt, H. P., Kammann, C. I., Harter, J., Borch, T., Young, R. B., Varga, K., Taherymoosavi, S., Elliott, K. W., McKenna, A., Albu, M., Mayrhofer, C., Obst, M., Conte, P., Dieguez-Alonso, A., Orsetti, S., Subdiaga, E., & Behrens, A. (2017). Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility. *Nature Communications*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01123-0>
- Haubold-Rosar, M., Heinkele, T., Rademacher, A., Kern, J., Dicke, C., Funke, A., Germer, S., Karagöz, Y., Lanza, G., Libra, J., Meyer-Aurich, A., Mumme, J., & Theobald, A. (2016). *Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die CSequestrierung in Böden*. Umweltbundesamt.
- Ippolito, J. A., Spokas, K. A., Novak, J. M., & Lentz, R. D. (2015). Biochar elemental composition and factors influencing nutrient retention. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management. Science, Technology and Implementation* (2nd ed., pp. 139–164). Routledge.
- Joseph, S., Kammann, C. I., Shepherd, J. G., Conte, P., Schmidt, H. P., Hagemann, N., Rich, A. M., Marjo, C. E., Allen, J., Munroe, P., Mitchell, D. R. G., Donne, S., Spokas, K., & Graber, E. R. (2018). Microstructural and associated chemical changes during the composting of a high temperature biochar: Mechanisms for nitrate, phosphate and other nutrient retention and release. *Science of the Total Environment*, 618(October), 1210–1223. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.200>
- Juillerat, P., Bäumler, B., Bornand, C., Eggenberger, S., Gyax, A., Jutzi, M., Möhl, A., Nyffeler, R., Sager, L., & Santiago, H. (2017). *Checklist 2017 der Gefäßpflanzenflora der Schweiz / de la flore vasculaire de la Suisse / della flora vascolare della Svizzera*. (Info Flora (Ed.)).
- Kadam, V. ., Meena, L. R., Singh, S., Shakyawar, D. B., & Naqv, S. M. K. (2014). Utilization of coarse wool in agriculture for soil moisture conservation. *Indian Journal of Small Ruminants (The)*, 20(2), 83–86.
- Karczmarczyk, A., Baryła, A., Fronczyk, J., Bus, A., & Mosiej, J. (2020). Phosphorus and metals leaching from green roof substrates and aggregates used in their composition. *Minerals*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/min10020112>

- Kaudal, B. B., Chen, D., Madhavan, D. B., Downie, A., & Weatherley, A. (2016). An examination of physical and chemical properties of urban biochar for use as growing media substrate. *Biomass and Bioenergy*, *84*, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.012>
- Koch, R., Emmel, M., Lohr, D., Frankenberg, A., Degen, B., Meinken, E., Haas, H., & Fischinger, S. (2015). Organische Dünger in Topfkulturen auf dem Prüfstand-wie steht es mit der Stickstofffreisetzung? In *Bodenfruchtbarkeit: N-Düngung und Verluste*. www.hswt.de
- Krawczyk, A., Domagała-Świątkiewicz, I., & Lis-Krzyściński, A. (2017). The effect of substrate on growth and nutritional status of native xerothermic species grown in extensive green roof technology. *Ecological Engineering*, *108*, 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.022>
- Kuoppamäki, K., Hagner, M., Lehvävirta, S., & Setälä, H. (2016). Biochar amendment in the green roof substrate affects runoff quality and quantity. *Ecological Engineering*, *88*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.12.010>
- Kuoppamäki, K., & Lehvävirta, S. (2016). Mitigating nutrient leaching from green roofs with biochar. *Landscape and Urban Planning*, *152*, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.04.006>
- Kuster, T., Eicher, O., Leumann, L., Müller, U., Poulet, J., & Rutishauser, R. (2017). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD): Düngung im Obstbau. *Agrarforschung Schweiz*, *8*(6), 1–20.
- Landolt, E., Bäumler, B., Erhardt, A., Hegg, O., Klötzli, F., Lämmli, W., & Nobis, M. (2010). *Flora Indicativa. Ökologische Zeigerwerte und biologische Kennzeichen zur Flora der Schweiz und der Alpen*. (2nd ed.). Haupt.
- Lehmann, J., & Schroth, G. (2003). Nutrient Leaching. In G. Schroth (Ed.), *Trees, Crops and Soil Fertility* (pp. 152–165). CABI Publishing.
- Loibl, W., Vuckovic, M., Etminan, G., Ratheiser, M., Tschannett, S., & Österreicher, D. (2021). Effects of Densification on Urban Microclimate - A Case Study for the City of Vienna. *Atmosphere*, *12*(4), 511. <https://doi.org/10.3390/atmos12040511>
- Mitchell, M. E., Hamilton, T. L., Uebel-Niemeier, C., Hopfensperger, K. N., & Buffam, I. (2018). Nitrogen cycling players and processes in green roof ecosystems. *Applied Soil Ecology*, *132*, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.08.007>
- Molineux, C. J., Fentiman, C. H., & Gange, A. C. (2009). Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K. *Ecological Engineering*, *35*, 1507–1513. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.06.010>
- Mulcahy, D. L., Mulcahy, D. N., Mulcahy, D. L., & Dietz, D. (2013). Biochar soil amendment increases tomato seedling resistance to drought in sandy soils. *Article in Journal of Arid Environments*, *88*(January), 222–225. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.07.012>
- Munzert, M. (2015). Auswertung zweifaktorieller Block-, Spalt- und Streifenanlagen. In *Landwirtschaftliche und gartenbauliche Versuche mit SAS*. (pp. 209–218). Springer-Lehrbuch. Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54506-1_32
- Nemati, M. R., Simard, F., Fortin, J.-P., & Beaudoin, J. (2015). Potential Use of Biochar in Growing Media. *Vadose Zone Journal*, *14*(6), 8. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.06.0074>
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y., & Rowe, B. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *BioScience*, *57*(10), 823–833. <https://doi.org/10.1641/B571005>
- Obersteiner, G., Sitter, M., Pertl, A., & Huber-Humer, M. (2015). Umweltauswirkungen der pyrolytischen Verkohlungs. *Österreichische Wasser- Und Abfallwirtschaft*, *67*(9–10), 369–376. <https://doi.org/10.1007/s00506-015-0263-6>
- Piepho, H.-P., & Bückse, A. (2003). *Spaltanlage - Messwiederholung - Dauerversuch: Hinweise zur Auswertung komplexer pflanzenbaulicher Versuche mit gemischten Modellen*. Skript zu einem Workshop gehalten bei der Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften.
- Quicker, P. (2016). Thermochemische Prozesse zur Herstellung von Biomassekarbonisaten. In K. Weber (Ed.), *Biokohle. Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten* (pp. 83–114). Springer Vieweg.
- Quicker, P., & Weber, K. (2016). Eigenschaften von Biomassekarbonisaten. In P. Quicker & K. Weber (Eds.), *Biokohle. Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten* (pp. 165–212). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-03689-8>

- Radloff, S. (2016). *Modellgestützte Bewertung der Nutzung von Biokohle als Bodenzusatz in der Landwirtschaft*. Universität Karlsruhe.
- Rajabinejad, H., Bucuşcanu, I. I., & Maier, S. S. (2019). Current approaches for raw wool waste management and unconventional valorization: A review. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(7), 1439–1456. <https://doi.org/10.30638/eemj.2019.136>
- Roberts, K. G., Gloy, B. A., Joseph, S., Scott, N. R., & Lehmann, J. (2010). Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environmental Science and Technology*, 44(2), 827–833. <https://doi.org/10.1021/es902266r>
- Schmidt, H.-P. (2011). Wege zu Terra Preta – Aktivierung von Pflanzenkohle. *Ithaka Journal*, 1, 28–32.
- Sharma, S. C., Sahoo, A., & Chand, R. (2019). Potential use of waste wool in agriculture: An overview. *Indian Journal of Small Ruminants (The)*, 25(1), 1. <https://doi.org/10.5958/0973-9718.2019.00019.9>
- Stünzi, H. (2004). Bodenuntersuchungsmethoden für K, Mg und Ca im Vergleich. *AGRARForschung*, 14(8), 358–363.
- Sutton, R. (2018). Recycled Substrates: Plant Biomass and Plant Cover Correlation. *Landscape Architecture Program: Faculty Scholarly and Creative Activity*. https://digitalcommons.unl.edu/arch_land_facultyschol/24
- Swedish Environmental Research Institute Ltd. (IVL). (2014). *Green Tools for Urban Climate Adaptation. Final Report. LIFE07 ENV/S/000908*. 79.
- Teodoro, M., Trakal, L., Gallagher, B. N., & Dinesh, M. (2020). Application of co-composted biochar significantly improved plant-growth relevant physical/chemical properties of a metal contaminated soil. *Chemosphere*, 242(March), 125255. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125255>
- Thommen, M. S. (1986). *Pflanzengemeinschaften natürlich besiedelter Kiesdächer und extensiver Dachbegrünungen*. Basel.
- Thuring, C., & Grant, G. (2016). The biodiversity of temperate extensive green roofs – a review of research and practice. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 62(1–2), 44–57. <https://doi.org/10.1080/15659801.2015.1091190>
- Toková, L., Igaz, D., Horák, J., & Aydin, E. (2020). Effect of biochar application and re-application on soil bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity, water content and soil water availability in a silty loam haplic luvisol. *Agronomy*, 10(7), 1005. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071005>
- Vefago, L. H. M. C., & Avellaneda, J. (2013). Recycling concepts and the index of recyclability for building materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.015>
- Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. (Ed.). (1991a). VDLUFA A 10.1.1: Bestimmung des Salzgehaltes in Böden, gärtnerischen Erden und Substraten. In *Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch) Methodenbuch 1*. (1st ed., p. 1442). VDLUFA-Verlag.
- Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. (Ed.). (1991b). VDLUFA A 13.0: Richtwerte und Empfehlungen für die Dachbegrünung. In *Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch) Methodenbuch 1*. (2nd ed., p. 1442). VDLUFA-Verlag.
- Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. (Ed.). (1991c). VDLUFA A 2.4.3.1: Bestimmung von Schwermetallen im Aufschluss mit Königswasser. In *Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch) Methodenbuch 1*. (1st ed., p. 1442). VDLUFA-Verlag.
- Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. (Ed.). (1997). VDLUFA A 7.6.1: Bestimmung von Spurennährstoffen und von umweltrelevanten Schwermetallen im EDTA -Auszug. In *Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch) Methodenbuch 1*. (2nd ed., p. 1442). VDLUFA-Verlag.

- Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. (Ed.). (2002). VDLUFA C 2.0 Einführung in die Texturanalyse. Korngrößenverteilung. In *Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch) Methodenbuch 1*. (3rd ed., p. 1442). VDLUFA-Verlag.
- Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. (Ed.). (2004). VDLUFA A 13.1.1: Richtwerte zur Bewertung der Untersuchungsergebnisse von gärtnerischen Substraten mit der CAT-Methode. In *Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch) Methodenbuch 1*. (4th ed., p. 1442). VDLUFA-Verlag.
- Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. (Ed.). (2016). VDLUFA A 4.1.3.1 Bestimmung von organischem Kohlenstoff durch Verbrennung und Gasanalyse (Differenzmethode). In *Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch) Methodenbuch 1*. (7th ed., p. 1442). VDLUFA-Verlag.
- Weber, K., Eichenauer, S., Stadlbauer, E., Schulten, M., Echterhof, T., Kammann, C., Schmidt, H.-P., Gerlach, A., & Gerlach, H. (2016). Bodenbezogene und landwirtschaftliche Anwendung. In P. Quicker & K. Weber (Eds.), *Biokohle. Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten* (pp. 284–311). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-03689-8>
- Whittinghill, L. J., Rowe, D. B., Ngouajio, M., & Cregg, B. M. (2016). Evaluation of nutrient management and mulching strategies for vegetable production on an extensive green roof. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40(4), 297–318. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1129011>
- Wilbois, A., Schwab, K.-P., Fischer, A., Palme, J., Peters, S., & Dongus, H. (2004). *Leitfaden für Praxisversuche*.
- Xu, C., Yuan, Q., Gaballah, E. S., Zhao, S., Fan, C., Zhang, X., Gao, Y., & Song, N. (2021). Pretreatments of wheat straw for possibility use in maintenance-free compressed green roof substrates. *Cellulose*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03883-x>
- Xu, C., Yuan, Q., Zhao, S., He, T., & Song, N. (2020). Effects of pretreatments on physical and chemical characteristics of wheat straw used as a maintenance-free compressed green roof substrate material. *Journal of Cleaner Production*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123381>
- Ye, S., Zeng, G., Wu, H., Liang, J., Zhang, C., Dai, J., Xiong, W., Song, B., Wu, S., & Yu, J. (2019). The effects of activated biochar addition on remediation efficiency of co-composting with contaminated wetland soil. *Resources, Conservation and Recycling*, 140(July), 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.004>
- Zavalloni, C., Alberti, G., Biasiol, S., Vedove, G. D., Fornasier, F., Liu, J., & Peressotti, A. (2011). Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: A short-term study. *Applied Soil Ecology*, 50(1), 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.07.012>
- Zheljzakov, V. D., Stratton, G. W., Pincock, J., Butler, S., Jeliakova, E. A., Nedkov, N. K., & Gerard, P. D. (2009). Wool-waste as organic nutrient source for container-grown plants. *Waste Management*, 29(7), 2160–2164. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.009>
- Zheljzakov, V. D., Stratton, G. W., & Sturz, T. (2008). Uncomposted wool and hair-wastes as soil amendments for high-value crops. *Agronomy Journal*, 100(6), 1605–1614., 100(6), 1605–1614. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0214>

INTERNETQUELLEN

- Bionika AG, Humusmanagement: <http://www.bionika.ch> (Zugriff: 08.01.2021)
- Futur Planter: <https://futureplanter.ch> (Zugriff: 06.05.2021)
- Meteo Schweiz. Klimadiagram Luzern: <https://www.meteoschweiz.admin.ch> (Zugriff: 08.01.2021)
- Müller-Stein Baustoff AG: <https://ms-baustoff.ch> (Zugriff: 08.01.2021)
- RICOTER Erdaufbereitung AG: <https://www.ricoter.ch> (Zugriff: 08.01.2021)
- Spycher Handwerk AG Huttwil: <https://www.spycher-handwerk.ch> (Zugriff: 20.01.2021)
- Verora GmbH. Produktion von Pflanzenkohle: <http://www.verora.ch> (Zugriff: 08.01.2021)
- Wildstaudengärtnerei, Patricia Willi: <https://www.wildstauden.ch> (Zugriff: 08.01.2021)

ANHANG

ANHANG 1: KENNWERTE UND RESULTATE

Tabelle 12. Anforderungen an die vegetationstechnischen Eigenschaften von einschichtigen und extensiven Gründachsubstraten. Tabelle mit den Kennwerten wurde aus den FLL-Richtlinien (2018, Tab. 20) übernommen. Die rot eingefärbten Messwerte liegen nicht innerhalb des Anforderungsbereichs.

Eigenschaft	Anforderung		Ergebnis	
	Einheit	Kennwert	Variante	Messwert
Korngrößenverteilung				
1) Anteil an abschlämmbaren Teilen ($d \leq 0.063 \text{ mm}$)	% Massenanteil	≤ 10	AS1	1.9
			AS2	1.7
			AS3	0.6
			FS	0.6
			V1	2.7
			V2	3.2
			V3	2.0
			V4	2.9
			V5	2.9
			V6	3.1
			V7	3.0
			C1	3.4
			C2	2.1
			C3	1.9
2) Anteil an Fein-/Mittelkies ($d > 4 \text{ mm}$)	% Massenanteil	≤ 75	AS1	25.3
			AS2	18.5
			AS3	16.9
			FS	4.9
			V1	14.6
			V2	17.8
			V3	10.8
			V4	17.1
			V5	15.2
			V6	14.6
			V7	14.4
			C1	19.1
			C2	15.1
			C3	10.6
Rohdichte (Volumengewichte)				
3) trockener Zustand	g/cm ³	-	AS1_Wn	1.07
			AS2_Wn	0.94
			AS3_Wn	1.12

Eigenschaft	Anforderung		Ergebnis				
	Einheit	Kennwert	Variante	Messwert			
			V1 Wn	1.44			
			V2 Wn	1.42			
			V3 Wn	1.31			
			V4 Wn	1.34			
			V5 Wn	1.39			
			V6 Wn	1.40			
			V7 Wn	1.09			
			C1 Wn	1.51			
			C2 Wn	1.55			
			C3 Wn	1.52			
			AS1 Wy	0.90			
			AS2 Wy	0.81			
			AS3 Wy	1.02			
			V1 Wy	1.34			
			V2 Wy	1.27			
			V3 Wy	1.31			
			V4 Wy	1.25			
			V5 Wy	1.21			
			V6 Wy	1.24			
			V7 Wy	1.12			
			C1 Wy	1.35			
			C2 Wy	1.49			
			C3 Wy	1.29			
			4) bei max. Wasserkapazität	g/cm ³	-	AS1 Wn	1.57
						AS2 Wn	1.40
						AS3 Wn	1.55
						V1 Wn	1.79
V2 Wn	1.77						
V3 Wn	1.67						
V4 Wn	1.71						
V5 Wn	1.73						
V6 Wn	1.77						
V7 Wn	1.47						
C1 Wn	1.81						
C2 Wn	1.87						
C3 Wn	1.85						
AS1 Wy	1.38						
AS2 Wy	1.29						
AS3 Wy	1.41						
V1 Wy	1.74						
V2 Wy	1.66						

Eigenschaft	Anforderung		Ergebnis	
	Einheit	Kennwert	Variante	Messwert
			V3 Wy	1.74
			V4 Wy	1.67
			V5 Wy	1.66
			V6 Wy	1.61
			V7 Wy	1.57
			C1 Wy	1.70
			C2 Wy	1.80
			C3 Wy	1.65
Wasser-/Lufthaushalt				
5) Gesamtporenvolumen	Vol.- %	-	AS1 Wn	55.99
			AS2 Wn	58.31
			AS3 Wn	46.84
			V1 Wn	33.85
			V2 Wn	34.61
			V3 Wn	37.27
			V4 Wn	36.09
			V5 Wn	34.02
			V6 Wn	35.02
			V7 Wn	37.48
			C1 Wn	29.71
			C2 Wn	31.70
			C3 Wn	33.11
			AS1 Wy	54.25
			AS2 Wy	56.18
			AS3 Wy	45.64
			V1 Wy	42.96
			V2 Wy	39.28
			V3 Wy	45.36
			V4 Wy	43.53
			V5 Wy	48.42
V6 Wy	37.02			
V7 Wy	48.63			
C1 Wy	38.63			
C2 Wy	35.05			
C3 Wy	39.91			
6) maximale Wasserkapazität	Vol.- %	20 - 60	AS1 Wn	50.24
			AS2 Wn	45.81
			AS3 Wn	43.28
			V1 Wn	35.26
			V2 Wn	35.31
			V3 Wn	36.28

Eigenschaft	Anforderung		Ergebnis	
	Einheit	Kennwert	Variante	Messwert
			V4 Wn	37.42
			V5 Wn	34.16
			V6 Wn	36.30
			V7 Wn	38.19
			C1 Wn	30.82
			C2 Wn	32.09
			C3 Wn	33.49
			AS1 Wy	47.47
			AS2 Wy	48.06
			AS3 Wy	38.74
			V1 Wy	40.34
			V2 Wy	38.24
			V3 Wy	43.31
			V4 Wy	41.88
			V5 Wy	45.69
			V6 Wy	36.46
			V7 Wy	45.45
			C1 Wy	35.17
			C2 Wy	31.21
			C3 Wy	35.78
7) Luftkapazität bei pF 1.8	Vol.- %	≥ 20	AS1 Wn	25.03
			AS2 Wn	23.52
			AS3 Wn	21.60
			V1 Wn	18.92
			V2 Wn	19.25
			V3 Wn	20.10
			V4 Wn	18.84
			V5 Wn	20.22
			V6 Wn	19.53
			V7 Wn	19.21
			C1 Wn	16.42
			C2 Wn	18.55
			C3 Wn	19.10
			AS1 Wy	23.34
			AS2 Wy	25.74
			AS3 Wy	21.20
			V1 Wy	33.66
			V2 Wy	30.23
			V3 Wy	33.24
			V4 Wy	34.72
V5 Wy	37.47			

Eigenschaft	Anforderung		Ergebnis	
	Einheit	Kennwert	Variante	Messwert
			V6 Wy	29.76
			V7 Wy	34.04
			C1 Wy	25.41
			C2 Wy	27.10
			C3 Wy	29.18
pH-Wert, Salzgehalt				
8) pH-Wert		6.5 - 8.0	AS1	8.11
			AS2	7.72
			AS3	7.17
			V1	7.06
			V2	7.3
			V3	7.24
			V4	7.145
			V5	7.06
			V6	7.005
			V7	7.055
			C1	7.08
			C2	7.095
			C3	7.115
9) Salzgehalt (Wasserextrakt)	g/l	≤ 3.5	AS1	0.72
			AS2	0.59
			AS3	1.25
			V1	0.55
			V2	0.26
			V3	0.43
			V4	0.34
			V5	0.51
			V6	0.48
			V7	0.44
			C1	0.46
			C2	0.58
			C3	0.45
Organische Substanz				
10) Gehalt an organischer Substanz	g/l	≤ 40	AS1	10.66
			AS2	6.64
			AS3	2.80
			V1	4.96
			V2	6.19
			V3	2.25
			V4	4.18
			V5	4.58

Eigenschaft	Anforderung		Ergebnis	
	Einheit	Kennwert	Variante	Messwert
			V6	4.58
			V7	4.38
			C1	4.19
			C2	3.37
			C3	2.83
Nährstoffe				
pflanzenverfügbare Nährstoffe				
11) Phosphor (P2O5) in 2x AAE10 & 1x H2O10	mg/l	≤ 200	AS1	189.95
			AS2	84.60
			AS3	83.99
			V1	151.34
			V2	154.33
			V3	69.28
			V4	79.14
			V5	135.28
			V6	143.74
			V7	65.62
			C1	117.73
			C2	95.69
			C3	119.26
12) Kalium (K2O) in 2x AAE10 & 1x H2O10	mg/l	≤ 700	AS1	1205.75
			AS2	737.42
			AS3	445.77
			V1	321.45
			V2	391.35
			V3	148.71
			V4	207.60
			V5	357.20
			V6	385.04
			V7	212.14
			C1	179.61
			C2	151.49
			C3	234.79
13) Magnesium (Mg) in 2x AAE10 & 1x H2O10	mg/l	≤ 200	AS1	284.03
			AS2	162.06
			AS3	201.29
			V1	305.05
			V2	317.79
			V3	193.15
			V4	191.70
			V5	275.04

Eigenschaft	Anforderung		Ergebnis	
	Einheit	Kennwert	Variante	Messwert
			V6	304.58
			V7	194.57
			C1	260.89
			C2	172.52
			C3	211.86
14) NO ₃ (LCK 339 Lange, DR600, Hach) als Proxy für Stickstoff (N) in CaCl ₂	mg/l	≤ 80	AS1	8.93
			AS2	17.3
			AS3	43.4
			V1	28.8
			V2	13.3
			V3	21
			V4	19
			V5	39.9
			V6	20
			V7	24.3
			C1	14.4
			C2	22.5
			C3	23.3

ANHANG 2: FEINANTEILE

BI **NIKA** *Baumgrabensubstrat Pflanzenkohle*

Aktivierete Verora-Pflanzenkohle als Zuschlagstoff in Baumgrabensubstrate

Für dieses organisch-mineralische Bodenverbesserungsmittel wurde EBC zertifizierte Verora-Pflanzenkohle mit Humus aufbauend wirkenden Zuschlagstoffen aktiviert. Die verwendete Verora-Pflanzenkohle ist unabhängig kontrolliert und zertifiziert durch q.inspecta GmbH. Sie hat eine grosse spezifische Oberfläche (um 300 m² / g) und einen hohen Kohlenstoffgehalt (80-85% C). Pflanzenkohle wirkt im Baumsustrat wie ein Schwamm. Sie speichert Feuchtigkeit, Nährstoffe und bietet nützlichen Bodenmikroorganismen ein optimales Milieu. So fördert die ins Baumsustrat eingemischte Pflanzenkohle dessen Durchwurzelung. Verbessert für Bäume und Sträucher die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit.

Zusammensetzung 90 % Verora – Pflanzenkohle grob (EBC-Zertifizierung „Futter“: q.inspecta GmbH)
in Vol. %: 10% Bionika Schwarzerde 15 mm Siebung (Humus aufbauend, mit geprüfter 1A Qualität)
3 % Bionika Humonit (Fimix E558)
30 – 40% Feuchtigkeit, Beimpfung mit Bionika Kompost-Extrakt

Anwendung:

- Beimischung ins Baumsustrat / Unterboden mit 5 – max. 30 Vol%
- in Baumsustrat vermischt tiefer als 30 cm unterhalb der Baumwurzeln einbauen

Lagerung: feucht lagern, Haltbarkeit ca. 4 Monate

(<http://www.bionika.ch/Substrate/Bionika-Substrat-Pflanzenkohle.htm>, Zugriff: 4. Juli 2021)

BI **NIKA** *Schwarzerde TP30 (Swiss Terra Preta)*

Dieses organisch-mineralische Bodenverbesserungsmittel wurde an Kleinmieten mit Schweizer Rohstoffen und Zuschlag von Verora Pflanzenkohle – EBC Feed (EBC Zertifizierung: q.inspecta GmbH) sorgfältig gelenkt kompostiert.

Bionika Schwarzerde TP30 ist ein regenerierender **Bodenverbesserer und zugleich Vollwertnahrung (Nährhumus) für anspruchsvolles Gemüse, Obst, Blumen, Bäume etc.** mit geprüfter Boden- und Pflanzenverträglichkeit (bestandene Schnelltests auf NH₄, NO₃, Sulfid, pH-Wert, Kressetest) nach Standards von www.bionika.ch. Die Bionika Schwarzerde zeigt in Tests eine vielseitige, reiche Belegung mit nützlichen Bodenmikroorganismen, besonders mit Humusbildnern.

Zusammensetzung	Grüngut, Gartenabfälle	40 - 60 %	Gehalte	Stickstoff: 0.5 -0.7% Gesamt N,
für Kompostierung:	Stallmist (Rinder, Pferde)	10 - 30 %	Gew. % in FS:	(NH ₄ < 3 mg/kg, NO ₃ >100 mg/kg)
	tonhaltige Erde	ca. 10 %		P2O5: 0.35- 0.45%, K2O: 0.7-0.9%
	Humuskompost	ca. 10 %		Mg: 0.35-0.45%, Ca: mind. 2.5%
	Verora Pflanzenkohle EBC zert.ca.	30 %		Trockensubstanz: 50- 60%
	Urgesteinsmehl, Tonminerale	ca. 2 %		Organische Substanz: < 30 %
				Leitfähigkeit: < 0.9 mS/cm

Anwendung: Während der Vegetationszeit oberflächlich einarbeiten oder in Gründüngung streuen:
- jährlich 1 bis 3 Liter pro m² oder max. 7.5 l/m² innert 3 Jahren nach Nährstoffbedarf der Kultur
- oder als Bodenverbesserung 20 bis max. 30 Liter je m² innert 10 Jahren je nach Bodenzustand
- zur **Aufwertung von Sackerden:** Anteil von 20 – 33% vor dem Eintopfen unter die Sackerde mischen.

Lagerung: Benötigt Luft und Feuchtigkeit: innert 14 Tagen Big Bag entleeren, anwenden oder an Miete mit Vliesabdeckung lagern

(<http://www.bionika.ch/Schwarzerde-Humus/Bionika-Schwarzerde-TP30-%2528Swiss-Terra-Preta%2529.htm>, Zugriff: 4. Juli 2021)

Kohlestruktur: sägemehlartig bis ca. 15 mm Länge



Big Bag à 1.2 m3, ca. 370 kg



30 l Sack im Karton für Paketversand



Verora - Pflanzenkohle

Bodenverbesserungs- und Einzelfuttermittel

Bei max. 600 °C pyrolysierte Pflanzenkohle aus Baum- und Strauchschnitthäcksel mit hochporöser Struktur (180 - 350 m² / Gramm)

Gehalt: 80 - 85 % Kohlenstoff in TS, Rohdichte ca. 0,28 to/m³

Anwendungen:

- Einstreuzusatz: bis 10 % Anteil oder pur auf nasse, glitschige Stellen
- Güllebehandlung: 1-2 Vol. % in die Gülle einrühren
- Mistbehandlung: 5 – 10 Vol. % in den Mist verteilen
- Kompostierung: 5 – 10 Vol. % als Kompostzuschlag
- Einzelfuttermittel: 0.4 – 0.8% der Gesamtration für alle Tierarten

Vorteil/Nutzen

- bindet Nährstoffe (Ammonium-N) und reduziert Gerüche, Fäulnis
- verbessert Luft- und Wasserhaushalt in Kompost und Boden
- verbessert Bodenstruktur, Nährstoffaustauschkapazität
- zur Herstellung der eigenen „Terra-Preta“ in Garten, Landwirtschaft
- CO₂ Speicherung im Boden = Klimaschutz
- hilft Verdauung zu regulieren (Durchfall, Giftstoffe binden)

garantierte Gehaltswerte in Frischsubstanz:

>60% Kohlenstoff, >20% Wasser, 0.4% N-Stickstoff, 0.1% P₂O₅-Phosphat, 0.4% K₂O-Kali, 0.1% Mg-Magnesium, 1.1% Ca-Calzium, 8.5 pH, <0,3 H/Corg, <1.0mS/cm Leitfähigkeit

Erfüllt die Anforderungen des Europäischen Pflanzenkohlezertifikat EBC für Futterkohle, EBC-Zertifizierung: q.inspecta GmbH.

Schutzmassnahmen: Aetzend, kann Staub entwickeln, nur feucht anwenden, persönliche Schutzausrüstung (Handschuhe und Atemschutzmaske) tragen. angefeuchtet in Sack lagern, Restmengen gemäss Anwendungsempfehlung aufbrauchen. Leere Packungen können der Kehrichtabfuhr mitgegeben werden.

VERORA

Ressourcenschonende Naturerzeugnisse

Abfüllmenge: 1200 l, ca. 370 kg

Herstellung und Vertrieb:

Verora AG
Heiterstalden 1, 6313 Edlibach
Tel. 041 531 32 48 / 079 208 80 48
Mail: mail@verora.ch
Web: www.pflanzenkohle.ch

(<http://www.bionika.ch/Verora-Pflanzenkohle/Verora-Pflanzenkohle-80-90%2525.htm>, Zugriff: 4. Juli 2021)



Rindenkompst

Anwendung

- zur Bodenlockerung, ca. 0.5 cm Schichtstärke, oberflächlich einarbeiten
- als Komponente von Pflanzerden vermischen mit Landerde, Torfersatz, Sand bis 40 % Vol.

Zusammensetzung

Koniferenrinde

Rübenbestandteile*

Rötte-Hilfsmittel
*pflanzliche Abfälle der Zuckerfabriken

Eigenschaften

- pH-Wert (H₂O) ca. 7.2
- Leitfähigkeit (Salzgehalt) ca. 1.3 mS/cm
- Volumengewicht ca. 525 g/l (CEN)
- C/N-Verhältnis 25–30:1

(<https://www.ricoter.ch/de/garten/rabatten/rindenkompst.php>, Zugriff: 4. Juli 2021)

ANHANG 3: BILDERREIHE WOLLWÄSCHE SPYCHER HANDWERK HUTTWIL



Abbildung 27: Waschprozess in der Wollwäscherei im Spycher Handwerk Huttwil (Fotos: C. Winter, 2021)

ANHANG 4: NACHWEISGRENZE IONENCHROMOTOGRAPHIE

Tabelle 13. Nachweisgrenze aller gemessenen Anionen und Kationen, wobei LOD = Limit of Detection, LOQ = Limit of Quantification und ULOQ = Upper Limit of Quantification angeben.

	mg/L		
	LOD	LOQ	ULOQ
Na ⁺	0.05	0.50	50.00
Ca ²⁺	0.08	0.80	50.00
NH ₄ ⁺	0.05	0.50	50.00
K ⁺	0.17	1.70	50.00
Mg ²⁺	0.05	0.50	50.00
Cl ⁻	0.00	0.01	50.00
NO ₂ ⁻	0.00	0.01	50.00
NO ₃ ⁻	0.00	0.03	50.00
PO ₄ ³⁻	0.01	0.06	50.00
SO ₄ ²⁻	0.00	0.03	50.00

ANHANG 5: VEGETATIONSAUFNAHME JUNI, 2021

Tabelle 14. Liste aller Arten, welche bei der Vegetationsaufnahme im Juni 2021 auf den Kleindächern gefunden wurden sowie deren Deckungsgrad (%) pro Parzelle und der mittlere Bedeckungsgrad über alle Parzellen und die Frequenz (Anz. Plots).

Parzelle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Mittlerer Bedeckungsgrad der Spezies (%) 2021	Freq. 2021 (Anz. Plot)	
Variante	V1	V1	V1	V2	V2	V2	V3	V3	V3	V4	V4	V4	C1	C2	V5	V5	V5	V6	V6	V6	V7	V7	V7	C3			
<i>Amaranthus blitum</i>										1	0.1															0.05	2
<i>Apiaceae sp</i>									0.1																	0.00	1
<i>Asteraceae sp.</i>		0.1		0.1							0.1					0.1		0.5								0.04	5
<i>Bromus erectus*</i>	2	0.5	10	1.5	1.5	1	0.5	0.5	1	1	1	0.2	1.5	3	0.5	1	2	1	1	1	1	1	1	0.1	1.45	24	
<i>Capsella bursa-pastoris</i>					1								2												0.13	3	
<i>Cerastium fontanum</i>								1																	0.04	2	
<i>Chenopodium album</i>			22	17	25	2	3	8	20	1	18	10	2	1	1			8	25	20			24	16	9.29	18	
<i>Chenopodium polyspermum</i>						2		8			0.2	2		2						2		8			1.01	7	
<i>Chenopodium sueccium</i>																			6						0.25	1	
<i>Cichorium intybus</i>																4									0.17	1	
<i>Dactylis glomerata</i>	4	5													0.5										0.40	3	
<i>Daugus carotta</i>	1						0.5																		0.06	2	
<i>Dianthus carthusianorum*</i>	1								0.1	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1		0.5			0.2	0.1	0.1	0.14	13		
<i>Echinochloa crus-galli</i>														1											0.04	1	
<i>Festuca sp.</i>					0.2									0.5										0.1	0.03	3	
<i>Galeopsis sp</i>			12																						0.50	1	

Erklärung betreffend das selbstständige Verfassen der Masterarbeit im Departement Life Sciences and Facility Management

Mit der Abgabe dieser Masterarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, das heisst, dass die Masterarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Ort/ Datum:

Unterschrift Studierende:

Luzern, 14. Juli 2021

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'C' followed by several horizontal and vertical strokes, resembling a cursive or abstract signature.