

Vegetationssubstrat für Gründächer auf Basis von Mauerwerksbruch aus porosierten Hochlochziegeln

Essen, den 04. Dezember 2023

1. EINLEITUNG

Alle Ziegelhersteller sind von den gesetzlichen Regelungen u.a. des Kreislaufwirtschaftsgesetzes betroffen. Zur Sicherung des Absatzmarktes ist der Nachweis der Recyclingfähigkeit der hergestellten Baustoffe unabdingbar. Durch das vorliegende Forschungsvorhaben kann zusätzlich noch ein Upcycling des Baustoffes Ziegel nach der vorgesehenen Lebensphase als Baumaterial realisiert und nachgewiesen werden. Durch die chemischen und physikalischen Analysen des Mauerwerksbruchs, die im Rahmen des Projektes durchgeführt wurden, konnte eine belastbare Datengrundlage geschaffen werden, die eine Unbedenklichkeit von RC-Ziegelmaterial bescheinigt. Gerade im Hinblick auf die zunehmende Sensibilität der Verbraucher bezüglich Schadstoffbelastungen durch Baumaterialien, stellt dies ein Kriterium dar, das steigendes Interesse am Baustoff Ziegel erwarten lässt, wenn die Forschungsergebnisse beim Marketing berücksichtigt werden.

Das Forschungsvorhaben hat gezeigt, dass Ziegelbruch aus Hochlochziegelmaterial sowie Dachziegel- und Mauerziegelmaterial aus Rückbauten zum Einsatz als Vegetationssubstrat geeignet sind. Mörtelanhaftungen führen zwar zu einem deutlich basischen pH-Wert, der Freilandversuch hat jedoch gezeigt, dass die eingesetzten Pflanzen gleiches Wachstumsverhalten zeigten als diejenigen, die in handelsübliches Material gepflanzt waren. Das Wasserrückhaltvermögen des porösen Hochlochziegelmaterials führte zu deutlich geringerem Wasserabfluss aus den Pflanzschalen und damit zu einer besseren Wasserversorgung der Pflanzen in den trockenen Sommermonaten. Intensive Regenperioden, wie im September 2022, führten zu einem gleichen Abfluss zwischen den beiden unterschiedlichen Granulaten.

Die Ergebnisse unterstreichen die Nutzung recycelter Ziegelmassen als Vegetationssubstrat und die Nachhaltigkeit von Ziegelprodukten. Gleichzeitig zeigt es einen weiteren Weg zur nachhaltigen Dachbegrünung auf.

Die erzielten Ergebnisse zeigten daher zu folgende Vorteile eines Gründachs insbesondere aus HLZ-Granulat.

- Ø durch hohe Porosität kommt es zu besonders guten Wasserspeichereigenschaften
- Ø durch die gute Wasserspeicherfähigkeit sinkt das Abflussvolumen
- Ø keine erhöhte Schwermetallbelastung des Abwassers
- Ø durch die deutlich geringe Wärmeleitfähigkeit, werden die Transmissionswärmeverluste im Winter reduziert.

2. Chemische und physikalische Bestimmung und Analyse der zu deklarierenden Eigenschaften entsprechend der Dachbegrünungsrichtlinie und Düngemittelverordnung für acht unterschiedliche Proben

Zu Beginn des Projektes wurden acht Hochlochziegeltypen mit unterschiedlicher Porosität ausgewählt. Darüber hinaus wurden ein alter Vormauerwerksbruch sowie ein Dachziegelbruch als Probe definiert. Der alte Vormauerwerksbruch und Dachziegelbruch wird bereits als Vegetationssubstrat eingesetzt, sodass diese verglichen werden können und die Vorteile von porierten Hochlochziegeln aufgezeigt werden können.

Im Anschluss erfolgte die Aufbereitung der ausgewählten Proben zu Substrat mit einer Kornklasse 4/12 mm. Dazu wurden die Hochloch-, Vormauer- und Dachziegel händisch zerkleinert, sodass eine anschließende Probenaufbereitung mit dem Backenbrecher möglich war. Die Zerkleinerung erfolgt zwischen der feststehenden und der mit hoher Frequenz oszillierenden Brechbacke, sodass in nur einem Schritt das Mahlgut die eingestellte Kornklasse erreicht.

Nach dem Aufschluss wurden die Proben gemäß DIN EN ISO 17892-4:2017 auf die Kornklassen 4/12 mm mittels einer Vibrationsplatte gesiebt.

Die Bestimmung des Porenvolumens GPV erfolgte in Anlehnung an VDLUFA C 4.2. Tabelle 1 stellt die ermittelten Porenvolumina, Porositäten und Scherbenrohdichten dar.

Tabelle 1: Übersicht der gemessenen Porenvolumina und der Porosität

Probe	Porosität [%]	Gesamtporen- volumen [dm ³ /kg]	Scherben- rohdichte kgdm ³
HLZ 1	48,4	0,3043	1,399
HLZ 2	40,8	0,2731	1,439
HLZ 3	40,6	0,2454	1,531
HLZ 4	44,3	0,2874	1,479
HLZ 5	48,9	0,3168	1,478
HLZ 6	36,3	0,2351	1,501
HLZ 7	41,5	0,2704	1,426
HLZ 8	37,6	0,2291	1,547
DZ_alt	30,3	0,1475	1,920
MZ_alt	24,2	0,1125	2,004

Die Scherbenrohdichten der verwendeten Hochlochziegel liegen zwischen 1.399 kg/m³ und 1.547 kg/m³. Die ermittelten Gesamtporenvolumina der Hochlochziegel liegen zwischen 0,2291 dm³/kg und 0,3168 dm³/kg, d.h. die Porosität liegt zwischen 36,3% und 48,9%, wodurch sich ein unterschiedliches Wasseraufnahmevermögen ergibt. Die Gesamtporenvolumina der Vormauerziegel und Dachziegel sind hingegen mit 0,1125 dm³/kg und 0,1475 dm³/kg deutlich niedriger, da diese Produkte nicht porosiert sind, höher Scherbenrohdichten aufweisen und bei höheren Temperaturen gebrannt werden.

Die Bestimmung der maximalen Wasserkapazität und Wasserdurchlässigkeit (mod. K_f) erfolgte gemäß der Vorgabe der Dachbegrünungsrichtlinien – Richtlinien für

Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen; Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., Bonn 2018.

Die maximale Wasserkapazität der Substrate wurde im verdichteten Zustand in zylindrischen Gefäßen durchgeführt und nach 24-stündiger Überstausättigung und zwei-stündigem Abtropfen durch die Gewichts Differenz ermittelt.

Die Wasserdurchlässigkeit wird als Wasserfiltrationsrate / Wasserschluckwert (mod. K_f) bestimmt. Ermittelt wird die Wasserdurchlässigkeit ebenfalls im verdichteten Zustand in zylindrischen Gefäßen und im Zustand der maximalen Wasserkapazität über das Absinken des überstauenden Wasserstandes in der Zeiteinheit. Die Wasserdurchlässigkeit wird entsprechend folgender Formel berechnet:

$$\text{mod. } K_f = \frac{1}{t} * \frac{h}{h + 4,0} \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$$

h = Höhe des verdichteten Prüfgutes in cm

t = Zeit für das Absinken des Wasserspiegels von 45 mm auf 35 mm in s

Tabelle 2 zeigt die ermittelten Wasserkapazitäten, Wasserdurchlässigkeiten sowie die Luftkapazitäten der acht Hochlochziegel sowie des Mauerwerksbruchs und des Dachziegelbruchs. Die Luftkapazität entspricht dem Porenvolumen eines Bodens bzw. eines Substrats, das bei Feldkapazität mit Luft gefüllt ist. Die Differenz zwischen Gesamtporenvolumen und maximaler Wasserkapazität ergibt die Luftkapazität.

Tabelle 2: Ermittelte Wasserkapazität, Wasserdurchlässigkeit sowie Luftkapazität an acht Hochlochziegel-, einem Mauerwerks- und einem Dachziegelbruch

Probe	Wasserkapazität [Vol.-%]	Wasserdurchlässigkeit [cm/s]	Wasserdurchlässigkeit [mm/min]	Luftkapazität [%]	Gesamtporenvolumen [%]
HLZ 1	25,5	202,5	33,75	46,1	71,6
HLZ 2	28,5	75,4	12,57	33,8	62,3
HLZ 3	24,5	161,5	26,92	35,4	59,9
HLZ 4	25,4	130,8	21,8	44,7	70,1
HLZ 5	27,5	548,2	91,37	46,3	73,8
HLZ 6	25,7	96,6	16,1	41,8	67,5
HLZ 7	25,9	1.275,80	212,63	43,3	69,2
HLZ 8	24,7	1.038,90	173,15	43,3	68
DZ_alt	16,2	1.327,20	221,2	47,2	63,5
MZ_alt	10,5	1.064,80	177,47	49,4	59,9

Die Wasserkapazitäten der Hochlochziegel sind alle auf einem ähnlich hohen Niveau. Die Wasserkapazitäten des Mauerwerksbruchs und des Dachziegels sind deutlich geringer, da sie, wie bei der Beurteilung der Porenvolumina beschrieben unterschiedlichen Porenaufbau besitzen. Die Wasserdurchlässigkeit der Proben ist sehr unterschiedlich; sie nehmen Werte von 75,4 cm/s bis 1.327,2 cm/s, bzw. 12,6 mm/min bis 221,2 mm/min ein. Die große Differenz ist mit dem nach der Aufbereitung deutlich unterschiedlichen Feinanteil zu erklären.

Vergleicht man diese Werte mit den Anforderungen an die vegetationstechnischen Eigenschaften von ein- und mehrschichtigen Extensiv-Begrünungen (Tabelle 1), so ist festzustellen, dass der HLZ-Bruch mit der Bezeichnung HLZ 1 bis HLZ 4 und HLZ 6 im mehrschichtigen Aufbau Verwendung finden könnte. Der Ziegelbruch HLZ 5 und HLZ 7 sowie der Dachziegel- und Mauerziegelbruch, jeweils aus dem Rückbau von Gebäuden, im einschichtigen Aufbau verwendet werden könnte.

In Anlehnung an VDLUFA A 5.1.1. wurde der pH-Wert mittels der Calciumchlorid-Methode bestimmt. Dazu wurden 10 g des jeweiligen Substrats in 25 mL Calciumchlorid-Lösung ($c=0,01 \text{ mol/L}$) eingerührt. Insbesondere die Substrate der Hochlochziegel zeigten einen alkalischen Charakter bedingt durch den höheren Kalkanteil im Feststoff im Vergleich zum Dachziegelsubstrat. Die Ergebnisse der pH-Wert Messung und der Bestimmung der Leitfähigkeit sind in Tabelle 3 dargestellt. Hier wird zusätzlich der Einfluss von Mörtelanhaftungen auf den pH-Wert deutlich.

Tabelle 3: Darstellung der Ergebnisse der pH-Wert Messungen

Probe	Leitfähigkeit [mS/cm]	pH-Wert	pH-Wert nach einfacher Sättigung	pH-Wert (+ 5 % Mörtel)	pH-Wert (+5 % Mörtel) nach einfacher Sättigung
HLZ 1	4,99	11,2	10,5	11,3	10,6
HLZ 2	8,01	11,8	10,8	11,8	11
HLZ 3	3,3	11,2	10,5	11,3	10,9
HLZ 4	3,21	8,8	8,4	11,2	10,5
HLZ 5	6,5	11,5	10,9	11,5	10,8
HLZ 6	3,4	10	9,7	11,2	10,7
HLZ 7	3,42	9,2	8,8	10,9	10,4
HLZ 8	3,62	9,5	8,9	11,1	10,5
DZ_alt	4,07	7,2	7,1	10,9	10,3
MZ_alt	3,14	9,1	8,4	11,1	10,5

Zu erkennen ist eine Reduktion des pH-Wertes durch vorherige Wassersättigung, ohne dass die Zugabe einer schwachen Säure notwendig ist. Bezogen auf den Einsatz als Vegetationssubstrat, zeigen die Ergebnisse, dass durch Regen der pH-Wert abnimmt. Während vom „frischen“ Bruch lediglich der Dachziegelbruch einzubauen wäre, sind nach der einfachen Sättigung weitere Bruchfraktionen unterhalb der pH-Werte nach Tabelle 5a und b. Ganz anders sieht es aus, sobald Mörtel an den Materialien anhaftet. In dem Fall bleiben die Proben deutlich am basischen Bereich.

Zusammenfassend sind die in Tabelle 4 gezeigten Ergebnisse im Vergleich zu den vorgegebenen Kennwerten aus der Dachbegrünungsrichtlinie aufgelistet.

Tabelle 4: Untersuchungsergebnisse

Substrateigenschaften	Einheit	Kennwert	Optigrün	MZ alt	HLZ neu

Wasser- und Lufthaushalt					
- maximale Wasserkapazität (WK)	Vol.-%	20 – 65	~ 20	10,5 – 22,6	25,5 – 28,5
- Luftkapazität bei max. WK	Vol.-%	≥ 10	-	36,8 – 46,5	44,1 – 46,1
- Wasserdurchlässigkeit	mm/min	60 – 400	> 60	> 450	> 350
pH-Wert		6,0 – 8,5	6,0 – 8,5	7,7 – 8,7	8,8 – 11,8
Salzgehalt (Wasserextrakt)	g/l	≤ 2,5	< 3	0,1 – 3,45	< 3,5
Pflanzenverfügbare Nährstoffe					
- Stickstoff	mg/l	≤ 80	-	13,9 – 189	0,4 – 0,7
- Phosphor	mg/l	≤ 200	-	12,3 – 36,1	0,1 – 63,4
- Kalium	mg/l	≤ 700	-	28,0 – 221	0,1 – 0,6
- Magnesium	mg/l	≤ 200	-	10,2 – 66,9	1,2 – 2,7
Physikalische Eigenschaften					
- Wärmeleitfähigkeit trocken	W/(m·K)	-	0,4	0,17	0,12 – 0,13
- Wärmeleitfähigkeit feucht	W/(m·K)	-	1,0	0,32	0,26 – 0,29
- Schüttdichte trocken	kg/m³	-	670	940 – 1.220	758 – 852
- Schüttdichte feucht	kg/m³	-	900 – 1.200	1.130 – 1.380	1.010 – 1.098

Betrachtet man die Werte der alten Mauerziegel aus Abbruchmaterial, (MZ alt), so fällt zunächst die hohe Wasserdurchlässigkeit auf. Da es sich bei diesem Material u.U. um hartgebranntes Vollziegelmaterial mit Mörtelanhaftungen handelt, ist die Wasseraufnahme des Materials gering und damit das Rückhaltevermögen des Granulats entsprechend hoch. Durch die Mörtelanhaftungen kann somit auch der pH-Wert höher ausfallen. Stammt dieses Material z.B. aus der Landwirtschaft und einem Stall, so ist der hohe Stickstoff- und Salzgehalt erklärlich

Darüber hinaus stellt Tabelle 5 die Gesamtnährstoffgehalte und die pflanzenverfügbaren Nährstoffe nach VDLUFA dar. Hier ist nicht die HLZ-Mischung analysiert worden, sondern die einzelnen Hochlochziegel.

Tabelle 5: Ergebnisse der Nährstoffgehalte in den Hochlochziegeln

	Stickstoff (N) in CaCl ₂ [mg/L]	Phosphor (P ₂ O ₅) (in CAL ^{*)} [mg/L]	Kalium (K ₂ O) (in CAL) [mg/L]	Magnesium (Mg) (in CaCl ₂) [mg/L]
HLZ 1	0,411	47,6	524	13,2
HLZ 2	0,447	40,7	49,1	<3,78
HLZ 3	0,510	45,1	54,3	4,2
HLZ 4	0,645	66,9	314	43,8
HLZ 5	0,487	63,4	298	<3,86
HLZ 6	0,608	57,3	254	35,3
HLZ 7	0,593	43,7	310	28,7
DZ_alt	45,5	18,3	31,9	34,7
MZ_alt	21,5	96,4	300	31,5
Grenzwerte nach Tabelle 1	≤ 80	≤ 50	≤ 500	≤ 200

*) Calcium-Acetat-Lactat-Auszug

3. Messtechnische Bestimmung der Eigenschaften der Substrate

Die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität und der spezifischen Wärmeleitfähigkeit ergab die in Tabelle 6 aufgeführten Messwerte. Im nächsten Schritt wurde die Rohdichte der fertigen Substrate im Trockenen sowie bei maximaler Wasserkapazität (WK) nach Verdichtung entsprechend des Proctorversuchs nach DIN 18127:2012 beziehungsweise der Dachbegrünungsrichtlinie Anhang B.1 durchgeführt. Die Ergebnisse werden in den Tabellen 7 und 8 dargestellt.

Tabelle 6: Ergebnisse der spezifischen Wärmekapazität sowie der Scherbenwärmeleitfähigkeit

Probe	Spezifische Wärmekapazität [J/m ³ K]	Scherbenwärme- leitfähigkeit [W/mK]
HLZ 1	1,4872	0,2495
HLZ 2	1,5007	0,2792
HLZ 3	1,5083	0,2767
HLZ 4	1,5522	0,3421
HLZ 5	1,5402	0,3342
HLZ 6	1,4424	0,3614
HLZ 7	1,6287	0,2459
HLZ 8	1,5530	0,2862
DZ_alt	n.n.*	n.n.*
MZ_alt	n.n.*	n.n.*

n.n.*: nicht nachweisbar

Tabelle 7: Ergebnisse der gemessenen Schüttdichten

Probe	Mittelwert Schüttdichte trocken [g/dm ³]	Mittelwert Schüttdichte bei max. WK [g/dm ³]	Mittelwert WK nach 24 h Überstau- sättigung [Vol.-%]
HLZ 1	770,2	1024,7	25,5
HLZ 2	787,9	1073,3	28,5
HLZ 3	852,6	1097,2	24,5
HLZ 4	793,7	1048,1	25,4
HLZ 5	757,9	1033,0	27,5
HLZ 6	765,6	1022,8	25,7
HLZ 7	750,4	1009,8	25,9
HLZ 8	794,4	1041,0	24,7
DZ	1006,8	1165,2	16,2
MZ_alt	1060,3	1169,3	10,5

Tabelle 8: Darstellung der Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung von trockenen Substraten und Substraten mit maximaler Wasserkapazität

Probe	Wärmeleitfähigkeit Substrat trocken				Wärmeleitfähigkeit Substrat feucht			
	$\lambda_{10,\text{dry}}$	$\lambda_{25,\text{dry}}$	$\lambda_{40,\text{dry}}$	$\lambda (T)$	$\lambda_{10,\text{max. WK}}$	$\lambda_{25,\text{max. WK}}$	$\lambda_{40,\text{max. WK}}$	$\lambda (T)$
	W/mK	W/mK	W/mK	W/mK	W/mK	W/mK	W/mK	W/mK
HLZ 1	0,1270	0,1325	0,1377	0,1271	0,2583	0,3347	0,4355	0,2542
HLZ 2	0,1186	0,1242	0,1294	0,1187	0,2665	0,3363	0,4232	0,2636
HLZ 3	0,1346	0,1407	0,1471	0,1347	0,2680	0,3403	0,4282	0,2654
HLZ 4	0,1288	0,1343	0,1391	0,1295	0,2936	0,3617	0,4494	0,2903
HLZ 5	0,1227	0,1287	0,1344	0,1227	0,2726	0,3361	0,4153	0,2700
HLZ 6	0,1182	0,1238	0,1292	0,1182	0,2881	0,3659	0,4681	0,2840
HLZ 7	0,1204	0,1263	0,1315	0,1205	0,2593	0,3225	0,4026	0,2565
HLZ 8	0,1156	0,1217	0,1272	0,1157	0,2847	0,3605	0,4617	0,2804
DZ_alt	0,1377	0,1449	0,1519	0,1430	0,3156	0,3906	0,4850	0,3123
MZ_alt	0,1632	0,1682	0,1735	0,2903	0,3025	0,3924	0,4961	0,3002

Eine grafische Darstellung der Ergebnisse zeigt Abbildung 1.

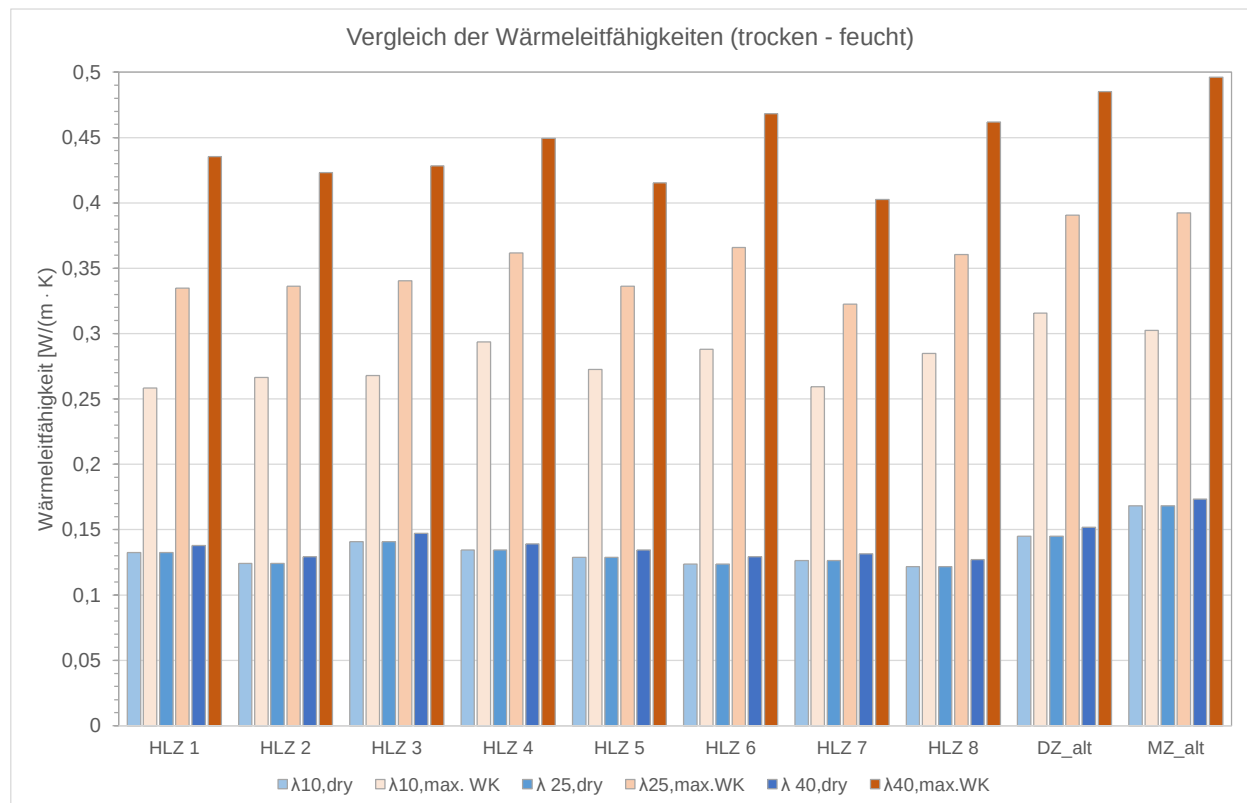


Abb. 1: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten im trockenen Zustand und bei maximaler Wassersättigung

Während sich im trockenen Zustand die Wärmeleitfähigkeiten zwischen der mittleren Temperatur von 10°C und 40°C kaum ändern, sind im gesättigten Zustand nicht nur zwischen den verschiedenen Mitteltemperaturen, sondern auch zwischen den verschiedenen Ziegeln deutliche Unterschiede zu erkennen, die auf das unterschiedliche Wasseraufnahmevermögen zurückzuführen sind.

4 Messtechnische Untersuchung von Substraten im eingebauten Zustand unter realen klimatischen Bedingungen

Im Laufe des Projektes stellte sich heraus, dass das hygrothermische Verhalten von mit hochporosierten Hochlochziegel begrünten Flachdächer unter realen klimatischen Bedingungen zu aussagekräftigeren Ergebnissen führen würde. Dazu wurde am Standort des Instituts für Ziegelforschung Essen e.V. in Essen auf einem Flachdach verschiedene Flachdachkonstruktionen aufgebracht und bezüglich ihres hygrothermischen Verhaltens untersucht.

Regelmäßige Messungen der Substrattemperaturen in den einzelnen Schichten und des Feuchtegehalts der Substrattypen fanden von Frühjahr 2022 bis Frühjahr 2023 statt. Darüber hinaus wurde das Außenklima (Lufttemperatur, relative Feuchte, Niederschlag, Diffus- und Globalstrahlung, Luftdruck und Windgeschwindigkeit und –richtung mit einer Wetterstation aufgezeichnet.



Abb.2: Darstellung der Wetterstation zum Aufzeichnen der klimatischen Bedingungen

Das Versuchsdach war über einem unbeheizten Garagendach angeordnet. Die insgesamt drei Versuchsdächer wurden mit einer Grundfläche von einem Quadratmeter ausgestattet. Die Versuchsaufbauten sowie die Aufzeichnung des Außenklimas zeigen die Abbildungen 3 und 4.



Abb.3: Freilandversuch / leeres Gefäß (Referenzdach)



Abb.4: Freilandversuch / gefüllte Gefäße

Der Aufbau der Kästen für die Freilandversuche ist Abbildung 20 zu entnehmen.

Dach	Aufbau	
Dach 1 (Optigrün Einschichtsubstrat Typ M)	Sedum- Bepflanzung 100 mm Vegetationssubstrat 0,8 mm Schutzvlies 40 mm Bautenschutzmatte Schwarze Abdichtung 15 mm Siebdruckplatten 100 mm Betondecke	
Dach 2 (Mauerwerksbruch aus Hochlochziegeln)	Sedum- Bepflanzung 100 mm Mauerwerksbruch 0,8 mm Schutzvlies 40 mm Bautenschutzmatte Schwarze Abdichtung 15 mm Siebdruckplatten 100 mm Betondecke	
Dach 3 (Referenzdach)	Schwarze Abdichtung 15 mm Siebdruckplatten 100 mm Betondecke	

Abb.20: Aufbau der Freilandversuche gemäß Fraunhofer Institut

Die Gefäße wurden mit verschiedenen Gewächsen bepflanzt und mit Thermosensoren in drei verschiedenen Höhen in den Granulatschichten versehen.

Das Pflanzenwachstum wurde regelmäßig begutachtet, d.h. die Untersuchungen bezogen sich auf:

- Pflanzenwachstum
- Temperaturentwicklung
- Schadstoffgehalte im Regenwasser
- Feuchtegehalt bzw. Wasseraufnahme

Für die Analyse des Schadstoffgehalts und des Regenwasserabflusses wurde die nachfolgend in Abbildung 5 gezeigte Ableitung aus den Gefäßen verwendet. Der dritte Wasserabfluss kam aus der ungefüllten Kiste (Referenzdach).



Abb. 5: 2 der 3 Gefäße des Freilandversuchs und die Wasserableitung



Abb.6: vergleichende Freilandversuche (frisch gepflanzt)

Für die Beobachtung und Beurteilung des Pflanzenwachstums wurde die Anordnung der Pflanzen annähernd gleich gestaltet, um so einen direkten Vergleich des Wachstums zwischen den beiden Granulaten zu haben.

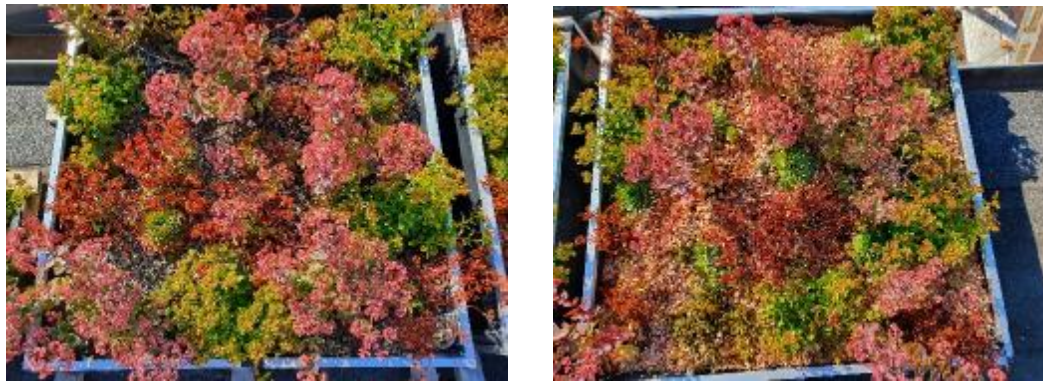


Abb. 7: vergleichende Freilandversuche (nach einem Monat)

Bereits nach einem Monat ist kein Unterschied zwischen beiden Kästen mit den unterschiedlichen Granulaten zu erkennen, obwohl es in dem Monat kaum geregnet hatte und hohe Sonneneinstrahlung war. Die Aufzeichnungen stammen aus dem Monat Juli 2022.

Während der Vegetationsperiode im Juli spielten nicht nur Temperatur und Regen eine Rolle, sondern ebenfalls die Sonneneinstrahlung und der Wind. Beides kann zu einer höheren Verdunstungsrate im Granulat führen.

Regenmengen führen zu einer Nachlieferung von Wasser in die Granulate. Um das Rückhaltevermögen der Granulate ebenfalls zu dokumentieren, wurde die Ablaufmenge aus den drei Kisten gemessen und analysiert. Die leere Kiste ohne Granulat bildet dabei das Referenzdach.

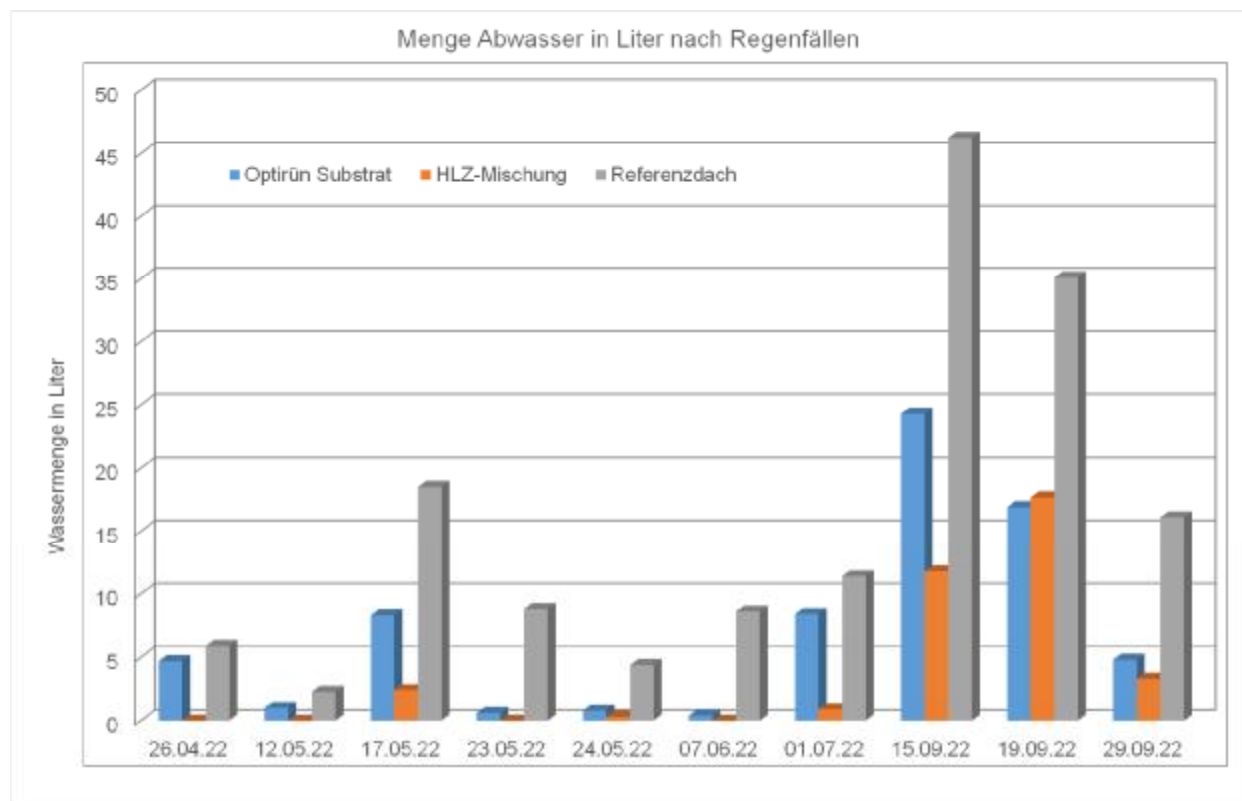


Abb. 8: Ablaufwassermenge aus den verschiedenen Freiluftaufbauten (Kiste 1-3)

Deutlich zu erkennen ist, dass das Hochlochziegelgranulat nach entsprechenden Regenfällen ein höheres Wasserrückhaltevermögen besitzt als das handelsübliche Granulat.

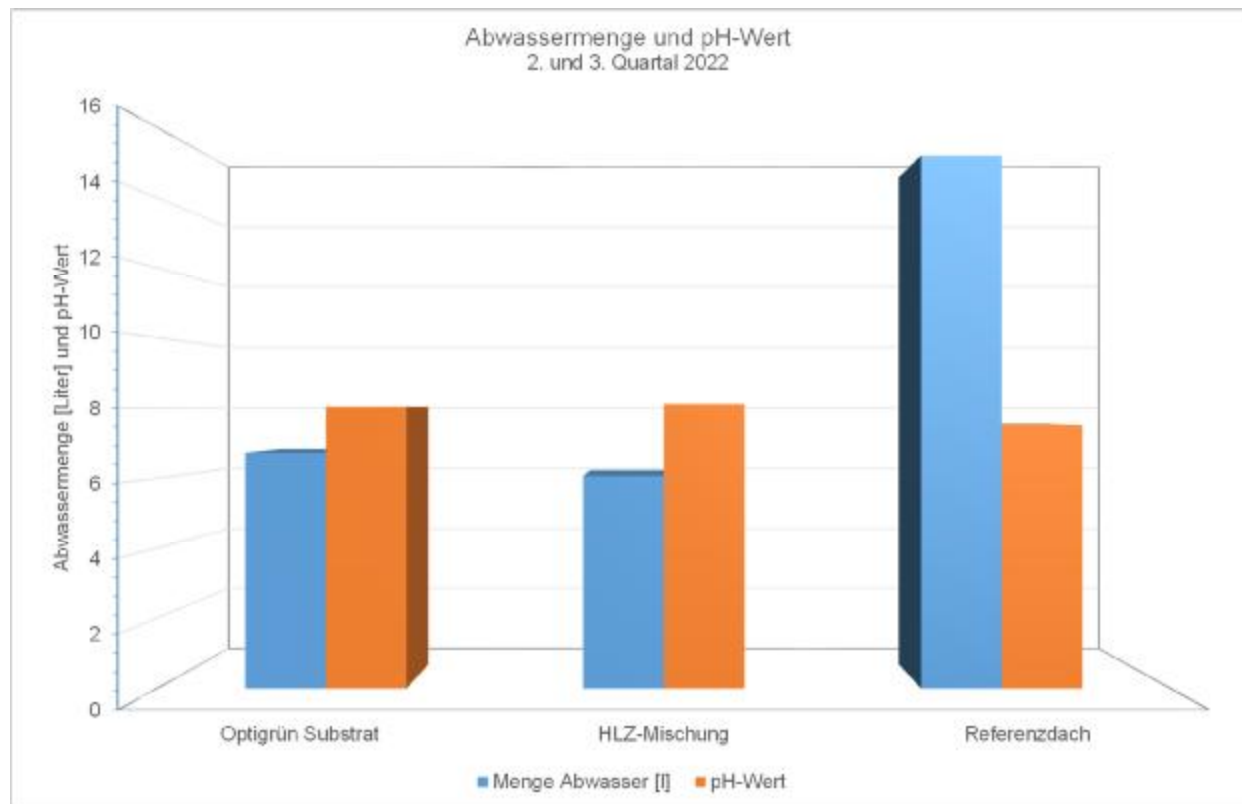


Abb. 9: Ablaufwassermenge und pH-Wert aus den verschiedenen Freiluftaufbauten

Betrachten man demgegenüber die gesamten Ablaufwassermengen über einen Zeitraum von 2 Quartalen (Abbildung 9), so relativiert sich der Unterschied zwischen den Granulaten. Von der insgesamt abgelaufenen Wassermenge (Kiste 3 - Referenzdach) von ca. 16 Litern in zwei Quartalen werden durch die Granulate und die Wasseraufnahme der Pflanzen lediglich ca. 6 Liter aus den „Granulatdächern“ als Ablaufwasser gefunden. Der pH-Wert steigt bei beiden Granulaten gegenüber dem reinen Regenwasser vom Referenzdach leicht an.

Starken Temperaturschwankungen auf dem Referenzdach werden bereits in den oberen Schichten der Gründächer abgeschwächt, unabhängig vom Granulat. Die gemessenen Temperaturen liegen über den tatsächlichen Umgebungslufttemperaturen, da die Sonneneinstrahlung Oberflächentemperaturen von bis zu 60°C auf dem Referenzdach hervorrufen. Unterhalb des Dachaufbaus steigen die Temperaturen in solchem Fall bis auf 35°C. Die Temperaturen der Dachaufbauten mit Granulat sind auch in den oberen Schichten deutlich niedriger. Hier spielt die Begrünung und das feuchtespeicherungsvermögen der Granulate eine entscheidende Rolle.

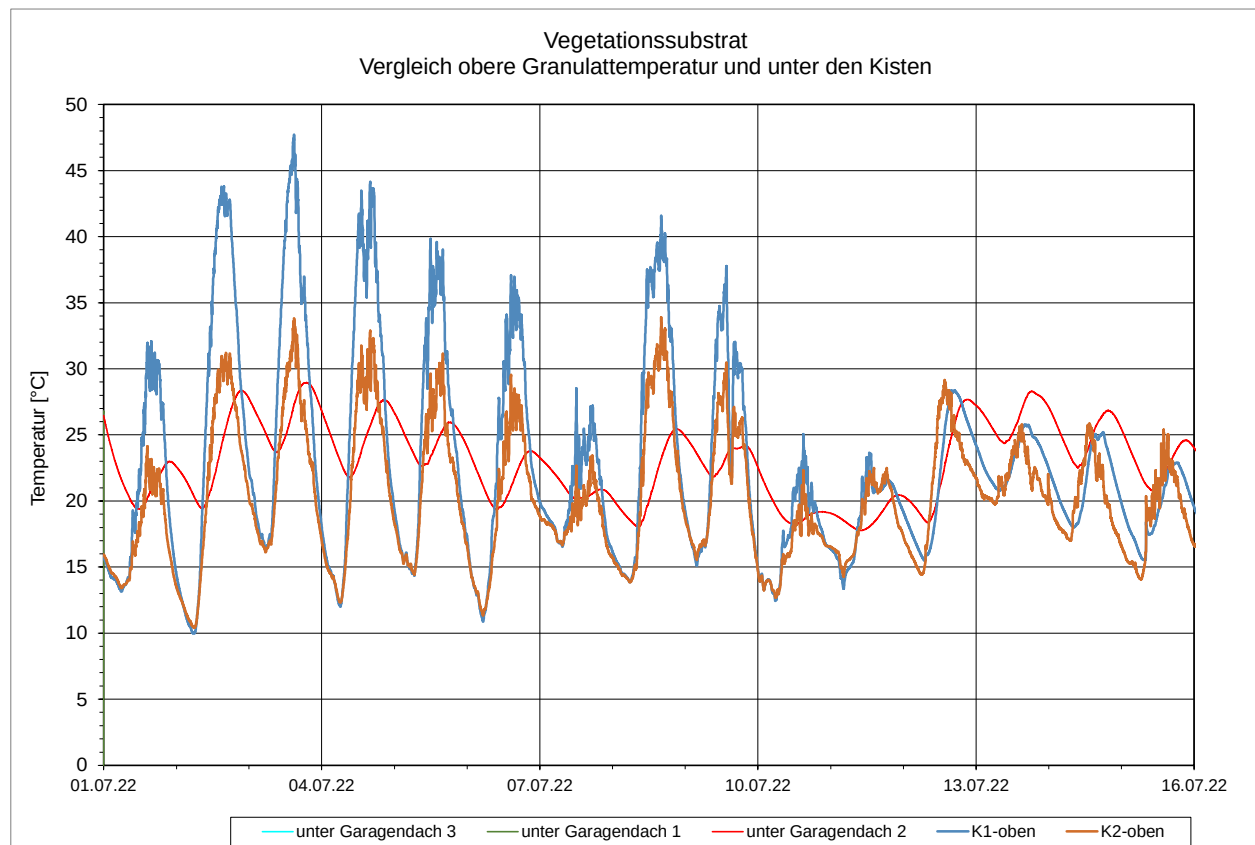


Abb. 10: Temperaturverläufe unterhalb der Dachaufbauten und in den oberen Granulatschichten

In Abbildung 10 sind die „Temperaturdämpfungen“ gegenüber der obersten Schicht im Granulat aufgezeigt. Es ist erkennbar, dass der Unterschied zwischen den Granulaten nur marginal ist, das Referenzdach mit 8 cm EPS-Dämmung hingegen größere Schwankungen aufweist.

4. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Alle Ziegelhersteller sind von den gesetzlichen Regelungen u.a. des Kreislaufwirtschaftsgesetzes betroffen. Zur Sicherung des Absatzmarktes ist der Nachweis der Recyclingfähigkeit der hergestellten Baustoffe unabdingbar. Durch das vorliegende Forschungsvorhaben kann zusätzlich noch ein Upcycling des Baustoffes Ziegel nach der vorgesehenen Lebensphase als Baumaterial realisiert und nachgewiesen werden. Durch die chemischen und physikalischen Analysen des Mauerwerkbruchs, die im Rahmen des Projektes durchgeführt wurden, konnte eine belastbare Datengrundlage geschaffen werden, die eine Unbedenklichkeit von RC-Ziegelmateriale bescheinigt. Gerade im Hinblick auf die zunehmende Sensibilität der Verbraucher bezüglich Schadstoffbelastungen durch Baumaterialien, stellt dies ein Kriterium dar, das steigendes Interesse am Baustoff Ziegel erwarten lässt, wenn die Forschungsergebnisse beim Marketing berücksichtigt werden.

Ebenso profitieren die KMU der Substrathersteller von den Forschungsergebnissen, da sie durch die Verwendung von RC-Ziegeln einen ressourceneffizient gewonnenen

Rohstoff zur Verfügung haben werden. Nicht zuletzt wird durch den Einsatz von Recyclingmaterial der Abbau der Primärrohstoffe Bims und Lava begrenzt, was eine Ressourcenschonung darstellt. Die wirtschaftliche Bedeutung des Projektes ist somit besonders hoch. Da Ziegler überwiegend den kleinen und mittleren Unternehmen zuzurechnen sind, sind diese im Allgemeinen nicht allein dazu in der Lage, Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wie die hier beantragte Forschungsmaßnahme durchzuführen. Das vorgestellte Projekt betrifft alle Produktarten der Ziegelindustrie. Mehr als 150 KMU-Betriebe werden daher gleichermaßen entweder direkt oder auf dem Umweg über die in der Ziegelbranche tätigen Anlagenbauer von den Ergebnissen dieses Projektes profitieren.

Das Forschungsvorhaben hat gezeigt, dass Ziegelbruch aus Hochlochziegelmaterial sowie Dachziegel- und Mauerziegelmaterial aus Rückbauten zum Einsatz als Vegetationssubstrat geeignet sind. Mörtelanhaftungen führen zwar zu einem deutlich basischen pH-Wert, der Freilandversuch hat jedoch gezeigt, dass die eingesetzten Pflanzen gleiches Wachstumsverhalten zeigten als diejenigen, die in handelsübliches Material gepflanzt waren. Das Wasserrückhaltvermögen des porösen Hochlochziegelmaterials führte zu deutlich geringerem Wasserabfluss aus den Pflanzschalen und damit zu einer besseren Wasserversorgung der Pflanzen in den trockenen Sommermonaten. Intensive Regenperioden, wie im September 2022, führten zu einem gleichen Abfluss zwischen den beiden unterschiedlichen Granulaten.

Die Ergebnisse unterstreichen die Nutzung recycelter Ziegelmassen als Vegetationssubstrat und die Nachhaltigkeit von Ziegelprodukten. Gleichzeitig zeigt es einen weiteren Weg zur nachhaltigen Dachbegrünung auf.

Die erzielten Ergebnisse zeigten daher zu folgende Vorteile eines Gründachs insbesondere aus HLZ-Granulat.

- durch hohe Porosität kommt es zu besonders guten Wasserspeichereigenschaften
- durch die gute Wasserspeicherfähigkeit sinkt das Abflussvolumen
- keine erhöhte Schwermetallbelastung des Abwassers
- durch die deutlich geringe Wärmeleitfähigkeit, werden die Transmissionswärmeverluste im Winter reduziert

Die erzielten positiven Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens lassen sich leicht in die Praxis umsetzen. Ziegelbruch kann sortenrein und auch mit geringen Anhaftungen vom Mörtel als Vegetationssubstrat eingesetzt werden. Die zu verwendenden Pflanzen müssen entsprechend ausgewählt werden.

Da die Ziegelindustrie überwiegend durch KMU in familiengeführten Unternehmen geprägt ist, ist eine finanzielle und zeitaufwändige Forschung und Entwicklung nicht durch die Unternehmen umsetzbar, weshalb sie auf Unterstützung angewiesen sind.

In seinem Marktreport 2022 schreibt der Bundesverband Gebäudegrün e.V. (BuGG): „Von 2008 bis 2021 wurden insgesamt 74.862.593 m² Gründachfläche angelegt, das bedeutet, dass der Gründach-Markt ist von 2008 bis 2021 um 141 % gewachsen ist.“

Von der Gesamtmenge wurden 62.704.804 m² Dachfläche extensiv begrünt, das entspricht 83,8 %. Von der Gesamtmenge wurden 12.157.789 m² Dachfläche intensiv begrünt, das entspricht 16,2 %. Der Gründach-Markt wächst im Durchschnitt jährlich um etwa 7,5 %. Der Trend geht zu Intensivbegrünungen (Dachgärten) und damit (überwiegend) begeh- und nutzbaren Dachbegrünungen.“

Das Forschungsvorhaben zeigt die Möglichkeit der Nutzung von Mauerwerksbruch aus modernem Hochlochziegelmateriale und unterstreicht die Nachhaltigkeit der Ziegelbauweise.