



Florian Hemetsberger, BSc.

Untersuchungen zur Begrünung von Beton mit Moos

Mooswachstum und Betoneigenschaften

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur/In

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer/In:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Joachim Juhart, Technische Universität Graz

Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie

mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung

Dipl.-Biol. Dr.rer.nat.habil. Christian Berg, Universität Graz

Institut für Biologie

Mitbetreuende(r) Assistent(en):

Marlene Sakoparnig MSc., Technische Universität Graz

Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie

mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung

Kontakt:
Florian Hemetsberger
flo.hemets@gmail.at

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used anything other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or contextually from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

Ich möchte mich bei all jenen bedanken, die mir während meiner Studienzeit zur Seite standen. Insbesondere möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, auf die ich immer zählen kann. Für die Ermöglichung meiner Masterarbeit möchte ich meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Joachim Juhart, Herrn Dipl.-Biol. Dr.rer.nat.habil. Christian Berg und dem Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie danken. Besonderen Dank für ihre Unterstützung bei meiner Masterarbeit möchte ich an Oliver Weidinger, Tobias Schröckmayr und Markus Pichler aussprechen.

Kurzfassung

Überhitzung und Feinstaubbelastung sind aktuelle Probleme im städtischen Gebiet (Umweltbundesamt, 2019b). Eine Möglichkeit, diesen entgegenzuwirken ist städtische Begrünung. Allerdings erweist sich diese oft als wartungs- und somit kostenintensiv (Frahm, 2007). Eine Pflanze, die kaum Wartungsaufwand verursacht, ist Moos. Es hat keine Wurzeln und nimmt die benötigten Nährstoffe (wie auch Feinstaub) über seine große spezifische Oberfläche aus der Luft auf (Frahm, 2006). Dadurch kann es auf Untergründen wachsen, die für andere Pflanzenarten ungeeignet sind, wie zum Beispiel Beton. Ziel dieser Arbeit ist, vier Betonvariationen hinsichtlich ihrer Eigenschaften in der Art zu analysieren, dass eine Aussage zum Bewuchs mit Moos getroffen werden kann. Die vom Untergrund ausgehenden, möglichen Faktoren für das Wachstum von Moos sind Rauigkeit, Feuchtigkeit und der pH-Wert. Die Betone wurden hinsichtlich ihrer Rauigkeit anhand einer Rautiefenbestimmung und optisch mit einem Mikroskop analysiert. Die Wasseraufnahmeeigenschaften wurden durch eine Messung der kapillaren Wasseraufnahme, der Reindichte, Rohdichte, der offenen Porosität, Gesamtporosität und ihrer Absorptionsisotherme bestimmt. Der pH-Wert der Betone wurde anhand einer optischen pH-Messung über den Querschnitt und durch zwei pH-Diffusionsprüfungen analysiert. Zusätzlich zu diesen Faktoren wurde auch die Biegezugfestigkeit der Betone bestimmt, um diese hinsichtlich ihrer mechanischen Belastbarkeit vergleichen zu können. Die Betone wurden in Form von Platten beim Botanischen Garten der Universität Graz in schattiger Umgebung mit den Moosarten *Amblystegium serpens*, *Hypnum cupressiforme*, *Brachythecium rutabulum* und *Rhynchostegium murale* und in sonniger Umgebung mit *Tortula muralis*, *Grimmia pulvinata*, *Orthotrichum anomalum* und *Schistidium crassipilum* bepflanzt und mehrere Monate ausgelagert. Das Mooswachstum wurde optisch gemessen und mit den Beton gemessenen Faktoren in Zusammenhang gebracht.

Die Ergebnisse der Messungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Das Habitat (schattig, sonnig) hat maßgeblichen Einfluss auf das Wachstum unterschiedlicher Moosarten. Nur in schattigem Habitat ist signifikantes Wachstum festzustellen. Dort wachsen auf Beton *Amblystegium serpens*, *Hypnum cupressiforme* und *Brachythecium rutabulum*. *Rhynchostegium murale* ist hingegen nicht mehr vorzufinden. Im sonnigen Habitat überlebten einzig *Orthotrichum anomalum* und *Schistidium crassipilum*. Moos überlebte nur auf Betonplatten mit schneller Wasseraufnahme und auch -abgabe, was darauf zurückzuführen ist, dass Moos im ausgetrockneten Zustand eine höhere Hitzetoleranz aufweist (Nörr, 1974).

Die Rauigkeit hat Einfluss auf das Mooswachstum. Bereits eine geringe Rautiefe (0,8 mm) ermöglicht Mooswachstum. Größere Rautiefe ist für die kombinierte Besiedlung mit *Amblystegium serpens*, *Hypnum cupressiforme* und *Brachythecium rutabulum* vorteilhaft. Die Wasseraufnahme, -abgabe und -speicherkapazität der Betone beeinflusst das Mooswachstum. Auf dem dichtesten Beton der Serie („Normalbeton“), war trotz seiner größeren Rautiefe gegenüber dem porösen UHPC geringeres Wachstum festzustellen. Er wies auch weniger Wachstum als der rauere, besonders poröse Drain- und Substratbeton auf. Ein poröses Gefüge mit Kapillarporen und feinen Haufwerksporen erscheint deshalb vorteilhaft für Mooswachstum im schattigen Habitat. Der pH-Wert im Inneren des Betons hat keinen messbaren Einfluss auf das Mooswachstum.

Beton eignet sich als Untergrund für Moos unter bestimmten Voraussetzungen und da er im Bauwesen umfassend eingesetzt wird, bietet es sich an, ihn mit Begrünung zu verbinden. Ein entsprechendes „Design“ der Betonoberfläche, bzw. einer oberflächlichen Schicht des Betons ist allerdings notwendig, um ihn für Mooswachstum gut geeignet zu gestalten. Diese Zone sollte oberflächlich rau und in die Tiefe porös sein.

Abstract

Overheating and particulate pollution are current problems in urban areas (Umweltbundesamt, 2019b). One way to counteract these issues is to implement vegetation within city structures. This urban greening is usually cost intensive due to maintenance efforts (Frahm, 2007). A plant that grows with barely any additional care is moss. It does not use roots to obtain nutrients (like fine particulates), but absorbs them with its big specific surface from the air (Frahm, 2006). That is one of the factors that allow it to grow on surfaces that are unsuitable for a lot of other plants, like concrete. The objective of this thesis is to analyse the properties of four types of concrete and interpret the differences regarding growth of moss on them. Surface roughness, moisture and the pH-value are possible factors for growth on a substrate of moss. The assessment of concrete surface roughness is based on a roughness depth and an optical microscope analysis. The water absorption property evaluation includes determination of capillary water absorption, true density, bulk density, apparent porosity, true porosity and an isothermal absorption curve. The pH value analysis is based on an optical pH imaging method over the cross section of the concrete and two pH diffusion tests. Additionally, to compare the mechanical load capacity of the concrete types, their flexural strength was measured. Concrete panels of all four types of concrete were placed in a shady environment with the moss species *Amblystegium serpens*, *Hypnum cupressiforme*, *Brachythecium rutabulum* and *Rhynchostegium murale* and in a sunny environment with *Tortula muralis*, *Grimmia pulvinata*, *Orthotrichum anomalum* and *Schistidium crassipilum* planted on them at the botanical garden of the University Graz. After several months the growth of moss was evaluated and interpreted.

The results sum up as follows:

The habitat (shady, sunny) has decisive influence on the growth of moss. Only in shady environment significant growth was measurable. *Amblystegium serpens*, *Hypnum cupressiforme* and *Brachythecium rutabulum* showed growth. *Rhynchostegium murale* completely disappeared. In sunny habitat only *Orthotrichum anomalum* and *Schistidium crassipilum* survived on panels with fast water absorption and release. The reason for moss surviving on those panels is explainable by the fact that dry moss shows higher resistance to high temperatures (Nörr, 1974).

The surface roughness influences moss growth. Already a small mean roughness depth (0,8 mm) allows growth of moss. Bigger mean roughness depth is advantageous for the combined growth of *Amblystegium serpens*, *Hypnum cupressiforme* and *Brachythecium rutabulum*. Water absorption, release and storage capacity of the concrete influences the moss growth. The concrete with the highest density of this testing ("Normalbeton") shows worse moss growth than the porous "UHPC", despite his higher mean roughness depth. It also shows worse moss

growth than the rougher, more porous “Drainbeton” and “Substratbeton”. A concrete microstructure with a high number of capillary pores and fine internal pores seems to be advantageous for moss growth in shady environment. The inner pH-value of concrete showed no significant influence on moss growth.

Under certain circumstances concrete is suitable as moss substrate. It is widely used in constructions and it makes sense to use it for urban greening, although appropriate design of the concrete is needed, or at least an additional surface layer, which features high surface roughness and high porosity.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Zielsetzung.....	5
2	Stand der Technik und Wissenschaft	7
2.1	Projekte zu urbanem Moosbewuchs	7
2.1.1	Sondierung für die Entwicklung von moosbewachsenen Gebäudefassadenpaneelen	7
2.1.2	Projekt Algen, Flechten, Moose und Farne auf Fassaden..	9
2.1.3	CityTree.....	10
2.1.4	Biological Concrete.....	11
2.1.5	Mooswand Stuttgart.....	13
2.2	Wachstumseigenschaften des Moores.....	15
2.2.1	Physiologie	15
2.2.2	Nährstoffaufnahme	19
2.2.3	Umweltfaktor Moos.....	20
2.3	Lebensraum, Charakteristik und Zeigerwerte	21
2.3.1	Tortula muralis.....	22
2.3.2	Grimmia pulvinata.....	24
2.3.3	Orthotrichum anomalum	26
2.3.4	Schistidium crassipilum	28
2.3.5	Amblystegium serpens	30
2.3.6	Hypnum cupressiforme.....	32
2.3.7	Brachythecium rutabulum.....	34
2.3.8	Rhynchostegium murale.....	36
3	Beton und Moos - Herstellung und Auslagerung	39
3.1	Ausgewählte Moosarten.....	39
3.2	Festlegung der zu untersuchenden Eigenschaften der Betonvarianten.....	39
3.2.1	Rauigkeit	39
3.2.2	Wasseraufnahme	40
3.2.3	pH-Wert.....	40

3.3	Herstellung des Betons	41
3.3.1	Poröser UHPC	42
3.3.2	Normalbeton	43
3.3.3	Drainbeton	43
3.3.4	Substratbeton.....	44
3.4	CO ₂ Vorbehandlung der Proben.....	46
3.5	Auslagerung der Proben.....	48
3.5.1	Auslagerung am 03.05.2018.....	48
3.5.2	Auslagerung am 05.06.2018.....	49
4	Messungen und Untersuchungsmethoden	53
4.1	Biegezugfestigkeit	53
4.2	Sandflächenverfahren	54
4.3	Kapillare Wasseraufnahme	56
4.4	Rohdichte, Reindichte, gesamte Wasseraufnahme offene Porosität und Gesamtporosität	58
4.5	Absorptionsisotherme.....	61
4.6	pH Messung über den Querschnitt.....	63
4.7	pH Diffusionsprüfung	66
4.8	Mikroskopie	68
4.9	Bildanalyse Mooswachstum	70
4.9.1	Gesamtzuwachs an Moosfläche aller Moosarten (Mooszuwachs).....	70
4.9.2	Mooswachstum der einzelnen Moosarten.....	74
4.10	Betonfeuchtigkeitsmessung der Auslagerungsproben.....	77
5	Ergebnisse	79
5.1	Biegezugfestigkeit	81
5.2	Rauigkeit	82
5.3	Wasseraufnahme	85
5.3.1	Kapillare Wasseraufnahme.....	85
5.3.2	Dichte, Porosität und Wasseraufnahme.....	90
5.3.3	Absorptionsisotherme	95
5.4	pH-Wert.....	97
5.4.1	pH Messung über den Querschnitt	97

5.4.2	pH Diffusionsprüfung	101
5.5	Messungen am Auslagerungsversuch	105
5.5.1	Sonnige Lagerung	105
5.5.2	Schattige Lagerung	109
6	Diskussion	117
7	Schlussfolgerungen, Zusammenfassung und Ausblick	125
	Literaturverzeichnis	129
	Anhang	i
Anhang A:	Bedeutung Zeigerwerte	iii
Anhang B:	Betonmischungsverhältnisse	vii
Anhang C:	Konditionierung Betonproben	xi
Anhang D:	Biegezugfestigkeit	xv
Anhang E:	Rautiefe	xvi
Anhang F:	Kapillare Wasseraufnahme	xvii
Anhang G:	Dichte, Porosität und Wasseraufnahme	xxii
Anhang H:	Absorptionsisotherme	xxvii
Anhang I:	Optisches pH-Messverfahren	xxviii
Anhang J:	Bildanalyse pH-Diffusionsprüfung	xxxiii
Anhang K:	Mikroskopie	xlii
Anhang L:	Bildanalyse Mooswachstum	lx
Anhang M:	Betonfeuchtigkeitsmessung Auslagerung	lxvii

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Bestandteile der Paneele: a...Granulat, b...Fließ, c...Metall-Grundgerüst (Pont u. a., 2018).....	7
Abb. 2-2:	City Tree (Green City Solutions, 2018).....	10
Abb. 2-3:	Simulation des Fassadenbewuchses des Aeronautical Cultural Centre in El Prat de Llobregat (Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2012).....	12
Abb. 2-4:	Mooswand Stuttgart (SMNSuttgart, 2017).....	13
Abb. 2-5:	Mooswand mit Sonnenschutz(Schwarz, 2018).....	14
Abb. 2-6:	Mooswand nach Abbau (Südwestrundfunk, 2018).....	14
Abb. 2-7:	Tortula muralis.....	22
Abb. 2-8:	Zeigerwerte Tortula muralis (Landolt u. a., 2010, mod.).....	23
Abb. 2-9:	Zeigerwerte Tortula muralis (Ellenberg u. a., 2001, mod.)	23
Abb. 2-10:	Grimmia pulvinata	24
Abb. 2-11:	Zeigerwerte Grimmia pulvinata (Landolt u. a., 2010, mod.)	25
Abb. 2-12:	Zeigerwerte Grimmia pulvinata (Ellenberg u. a., 2001, mod.).....	25
Abb. 2-13:	Orthotrichum anomalum.....	26
Abb. 2-14:	Zeigerwerte Orthotrichum anomalum (Landolt u. a., 2010, mod.).....	27
Abb. 2-15:	Zeigerwerte Orthotrichum anomalum (Ellenberg u. a., 2001, mod.).....	27
Abb. 2-16:	Schistidium crassipilum.....	28
Abb. 2-17:	Zeigerwerte Schistidium crassipilum (Landolt u. a., 2010, mod.).....	29
Abb. 2-18:	Amblystegium serpens.....	30
Abb. 2-19:	Zeigerwerte Amblystegium serpens (Landolt u. a., 2010, mod.).....	31
Abb. 2-20:	Zeigerwerte Amblystegium serpens (Ellenberg u. a., 2001, mod.).....	31
Abb. 2-21:	Hypnum cupressiforme	32
Abb. 2-22:	Zeigerwerte Hypnum cupressiforme (Landolt u. a., 2010, mod.).....	33
Abb. 2-23:	Zeigerwerte Hypnum cupressiforme (Ellenberg u. a., 2001, mod.).....	33
Abb. 2-24:	Brachythecium rutabulum.....	34
Abb. 2-25:	Zeigerwerte Brachythecium rutabulum (Landolt u. a., 2010, mod.).....	35
Abb. 2-26:	Zeigerwerte Brachythecium rutabulum (Ellenberg u. a., 2001, mod.).....	35
Abb. 2-27:	Rhynchostegium murale.....	36

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-28:	Zeigerwerte Rhynchosstegium murale (Landolt u. a., 2010, mod.)	37
Abb. 2-29:	Zeigerwerte Rhynchosstegium murale (Ellenberg u. a., 2001, mod.).....	37
Abb. 3-1:	Rhizoiden von Fossombronina wondraczekii.....	40
Abb. 3-2:	Abnahme der Biegezug- und Druckfestigkeit bei zunehmenden W/Z – Faktor (W/B _a -Wert) (Stehno, 1981).....	42
Abb. 3-3:	Poröser UHPC	42
Abb. 3-4:	Normalbeton	43
Abb. 3-5:	Drainbeton	43
Abb. 3-6:	Betonplattenpresse	44
Abb. 3-7:	Töpfertonmischung in Betonplattenpresse.....	44
Abb. 3-8:	In Betonplattenpresse eingelegte Drainbetonplatte	45
Abb. 3-9:	Substratbeton	45
Abb. 3-10:	Substratbeton gebrochen.....	45
Abb. 3-11:	Beton mit Agar-Agar und Moos.....	48
Abb. 3-12:	Schattige Auslagerung.....	49
Abb. 3-13:	Sonnige Auslagerung	49
Abb. 3-14:	Schattige Auslagerung.....	50
Abb. 3-15:	Sonnige Auslagerung	50
Abb. 3-16:	Agar-Agar Überschuss auf Normalbeton	50
Abb. 3-17:	Normalbeton nach 49 Tagen	51
Abb. 3-18:	Drainbeton nach 49 Tagen	51
Abb. 4-1:	Prinzip der Biegezugprüfung (ÖNorm EN 1339:2007-01-01, mod.).....	53
Abb. 4-2:	Hilfsmittel Sandflächenverfahren	54
Abb. 4-3:	Rautiefenbestimmung von porösen UHPC (links) und Normalbeton (rechts).....	55
Abb. 4-4:	Rautiefenbestimmung von Drain- (links) und Substratbeton (rechts)	55
Abb. 4-5:	Wasserlagerung kapillare Wasseraufnahme poröser UHPC.....	56
Abb. 4-6:	Exsikkator mit porösen UHPC-Proben.....	58
Abb. 4-7:	Exsikkator mit porösen UHPC-Proben und entmineralisiertem Wasser	59
Abb. 4-8:	Pyknometer im Exsikkator unter Vakuum	60
Abb. 4-9:	Typische Sorptionsisotherme von Beton (Hermann, 2000)	62
Abb. 4-10:	Prinzip der optische pH-Messung (Müller u. a., 2018, mod.)	64
Abb. 4-11:	Versuchsaufbau optische pH-Messung	64
Abb. 4-12:	Aufnahme ohne Beleuchtung (links) und mit Beleuchtung (rechts).....	65

Abb. 4-13:	Geschnittene poröse UHPC-Probe	65
Abb. 4-14:	Optische pH-Messung poröser UHPC.....	65
Abb. 4-15:	Versuchsaufbau 1. Diffusionsprüfung.....	66
Abb. 4-16:	1. Diffusionsprüfung: Indikatorlösung auf Drainbeton nach 2 Tagen	67
Abb. 4-17:	Lagerung 2. Diffusionsprüfung (links), Chloridsonde mit pH Elektrodenmodul (rechts).....	67
Abb. 4-18:	Tiefenscharfes Bild – Drainbeton	68
Abb. 4-19:	Lineare Analyse Drainbeton	68
Abb. 4-20:	Luftpore Normalbeton.....	69
Abb. 4-21:	Fotodokumentation Drainbeton (D-Sch-K-3)	70
Abb. 4-22:	Auswahl der gesamten Moosfläche vom 05.10.2018 mit Lasso-Tool.....	70
Abb. 4-23:	Farbauswahl.....	71
Abb. 4-24:	Ausgewählte Gesamtfläche des Moores	71
Abb. 4-25:	Histogramm	72
Abb. 4-26:	Referenzfläche	72
Abb. 4-27:	Auswahl der gesamten Moosfläche von 06.06.2018 mit Lasso-Tool.....	73
Abb. 4-28:	Auswahl von Hypnum cupressiforme vom 05.10.2018 mit Lasso-Tool.....	74
Abb. 4-29:	Farbauswahl.....	74
Abb. 4-30:	Ausgewählte Moosfläche von Hypnum cupressiforme	75
Abb. 4-31:	Histogramm	75
Abb. 4-32:	Referenzfläche	75
Abb. 4-33:	Auswahl von Hypnum cupressiforme vom 06.06.2018 mit Lasso-Tool.....	76
Abb. 4-34:	Tramex CMEXPERT II	77
Abb. 5-1:	Biegezugfestigkeit von porösem UHPC, Normalbeton und Drainbeton.....	81
Abb. 5-2:	Bestimmung der Rautiefe von porösem UHPC, NB, DB und SB	82
Abb. 5-3:	Einzelrautiefe von porösem UHPC, NB, DB und SB	83
Abb. 5-4:	Porenräume der Schnittfläche von porösem UHPC, NB, DB und SB.....	84
Abb. 5-5:	Kapillare Wasseraufnahme poröser UHPC	85
Abb. 5-6:	Kapillare Wasseraufnahme Normalbeton.....	86
Abb. 5-7:	Kapillare Wasseraufnahme Drainbeton.....	87
Abb. 5-8:	Kapillare Wasseraufnahme Substratbeton	88
Abb. 5-9:	Wasseraufnahme nach 24 Stunden infolge Kapillarwirkung von porösem UHPC, NB, DB und SB.....	89
Abb. 5-10:	Rohdichte von porösem UHPC, NB, DB und SB.....	90
Abb. 5-11:	Reindichte von porösem UHPC, NB, DB und SB	91

Abbildungsverzeichnis

Abb. 5-12:	Offene Porosität von porösem UHPC, NB, DB und SB	91
Abb. 5-13:	Wiederholte Messung von Drainbeton, Substratbeton mit und ohne Ton.....	92
Abb. 5-14:	Gesamtporosität von porösem UHPC, NB, DB und SB	93
Abb. 5-15:	Gesamte Wasseraufnahme von porösem UHPC, NB, DB und SB.....	94
Abb. 5-16:	Absorptionsisotherme (Hunkeler & Holtzhauer, 1994, mod.)	96
Abb. 5-17:	Poröser UHPC: optische Bildanalyse (links) und Probe (rechts).....	97
Abb. 5-18:	Ausgangstück Normalbetonprobe.....	98
Abb. 5-19:	Normalbeton: optische Bildanalyse (links) und Probe (rechts).....	98
Abb. 5-20:	Drainbeton: optische Bildanalyse (links) und Probe (rechts).....	99
Abb. 5-21:	Substratbeton: optische Bildanalyse (links) und Probe (rechts).....	99
Abb. 5-22:	Karbonatisierungstiefe von porösem UHPC, NB, DB und SB.....	100
Abb. 5-23:	Kontinuierliche pH-Messung des Lagerungswassers von porösem UHPC, NB, DB und SB	101
Abb. 5-24:	Poröser UHPC mit Indikatorlösung: 2 Tage links, 4 Tage Mitte, 6 Tage rechts	102
Abb. 5-25:	Normalbeton mit Indikatorlösung: 2 Tage links, 4 Tage Mitte, 6 Tage rechts	102
Abb. 5-26:	Drainbeton mit Indikatorlösung: 2 Tage links, 4 Tage Mitte, 6 Tage rechts.....	102
Abb. 5-27:	Substratbeton mit Indikatorlösung: 2 Tage links, 4 Tage Mitte, 6 Tage rechts	102
Abb. 5-28:	Poröser UHPC mit Indikatorlösung nach 14 Tagen Wasserlagerung.....	103
Abb. 5-29:	Normalbeton mit Indikatorlösung mit Indikatorlösung nach 14 Tagen Wasserlagerung.....	103
Abb. 5-30:	Drainbeton mit Indikatorlösung nach 14 Tagen Wasserlagerung.....	104
Abb. 5-31:	Substratbeton mit Indikatorlösung nach 14 Tagen Wasserlagerung.....	104
Abb. 5-32:	Temperatur und relative Luftfeuchte der sonnigen Lagerung.....	105
Abb. 5-33:	UHPC _{SO} -2-K (links: 06.06.2018, rechts: 05.10.2018)	107
Abb. 5-34:	D _{SO} -3 (links: 06.06.2018, rechts: 05.10.2018)	108
Abb. 5-35:	D _{SO} -3 am 30.04.2019.....	108

Abb. 5-36:	Temperatur und relative Luftfeuchte der schattigen Lagerung	109
Abb. 5-37:	Mooszuwachs auf den Betonproben am 05.10.2018	111
Abb. 5-38:	Mooszuwachs auf den Betonproben 15.05.2019	112
Abb. 5-39:	D _{SCH} -1: links: 06.06.2018, Mitte: 05.10.2018, rechts: 15.05.2018	112
Abb. 5-40:	Mooswachstum von AS, HC und BR am porösen UHPC	113
Abb. 5-41:	Mooswachstum von AS, HC und BR am Normalbeton	114
Abb. 5-42:	Mooswachstum von AS, HC und BR am Drainbeton	115
Abb. 5-43:	Mooswachstum von AS, HC und BR am Substratbeton	115
Abb. 6-1:	Trend der Biegezugfestigkeit von porösem UHPC, NB und DB zur Gesamtporosität	118
Abb. 6-2:	Trend des Mooswachstums von AS, HC und BR und des Gesamtzuwachses aller Moose zur Gesamtporosität	119
Abb. 6-3:	Trend der Rautiefe der Betone gegen den Mooszuwachs	119
Abb. 6-4:	Trend der Rautiefe gegen das Mooswachstum	120
Abb. 6-5:	Offene Porosität von porösem UHPC, Normalbeton und Drainbeton gegen Mooszuwachs und Mooswachstum	121
Abb. 6-6:	Wasseraufnahmekoeffizient von porösem UHPC, Normalbeton und Drainbeton gegen Mooszuwachs und Mooswachstum	122
Abb. 6-7:	Feuchtigkeit der Betonoberseite von porösem UHPC, Normalbeton und Drainbeton gegen Mooszuwachs und Mooswachstum	123
Abb. 6-8:	Gegenüberstellung von Mooswachstum und Karbonatisierung der Betone	124

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Kennwerte Standortfaktoren.....	3
Tabelle 1-2:	Kennwerte betonspezifischer Eigenschaften.....	4
Tabelle 1-3:	Kenngößen der Messung an den ausgelagerten Proben.....	4
Tabelle 2-1:	Beobachtete Arten von Moosen (Hofbauer u. a., 2003)	9
Tabelle 3-1:	Zuordnung der Moosarten.....	39
Tabelle 3-2:	Übersicht Betonmischungen.....	41
Tabelle 3-3:	Konditionierung Betonplatten	47
Tabelle 3-4:	Probenauflistung Auslagerung 03.05.2018	48
Tabelle 3-5:	Probenauflistung Auslagerung 05.06.2018	49
Tabelle 5-1:	Auflistung Messergebnisse von porösem UHPC, NB, DB und SB	79
Tabelle 5-2:	Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient poröser UHPC.....	85
Tabelle 5-3:	Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient Normalbeton.....	86
Tabelle 5-4:	Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient Drainbeton.....	87
Tabelle 5-5:	Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient Substratbeton.....	88
Tabelle 5-6:	Wiederholte Messung von Drainbeton, Substratbeton mit und ohne Ton	92
Tabelle 5-7:	Auflistung der Ausgleichsfeuchte [M.-%].....	95
Tabelle 5-8:	Messung mit pH-Sonde	103
Tabelle 5-9:	Standortfaktoren sonnige Lagerung	106
Tabelle 5-10:	Betonfeuchtigkeit sonnige Lagerung	106
Tabelle 5-11:	Standortfaktoren schattige Lagerung	109
Tabelle 5-12:	Betonfeuchtigkeit schattige Lagerung	110
Tabelle 5-13:	Auflistung Messergebnisse der schattigen Auslagerung	116

Abkürzungsverzeichnis

Klx	Kilolux
lx	Lux
n.B.	Nördliche Breite
r.Lf.	Relative Luftfeuchte
mM	Millimol
AS	Amblystegium serpens
HC	Hypnum cupressiforme
BR	Brachythecium rutabulum
UHPC	Ultrahochfester Beton
NB	Normalbeton
DB	Drainbeton
SB	Substratbeton
k.	Karbonatisiert
n. k.	Nicht karbonatisiert
f. g.	Frisch gebrochen
M.-%	Masseprozent

1 Einleitung

Im Jahr 2015 lebten 54,6 % der Weltbevölkerung in Städten. Dieser Wert wird laut einer Prognose des Departments of Economic and Social Affairs bis 2050 auf 85,4% ansteigen (Department of Economic and Social Affairs Population Division, 2014). Wegen dichtem Verkehrsaufkommen, Industrie und Gewerbe ist die Atemluft in menschlichen Ballungsräumen einer hohen Belastung von Schadstoffen wie Feinstaub, Kohlendioxid, Stickoxid, Kohlenmonoxid Schwefeloxid und Benzol ausgesetzt. Ihre negativen Einflüsse auf den Menschen umfassen nicht nur Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen, sondern auch klimatische Erwärmung infolge von Treibhausgasen wie Kohlendioxid. Zusätzlich ist städtisches Gebiet aufgrund von dichter Bebauung, Bodenversiegelung und begrenzter Vegetation stark von steigenden Temperaturen betroffen (Bundesministerium Verkehr Innovation und Technologie, 2018). Klimatische Faktoren, wie Sonneneinstrahlung, Wind und die Eigenschaften der urbanen Oberfläche, haben zudem einen maßgeblichen Einfluss auf die Lebensqualität im Stadtgebiet (Pitha u. a., 2013). Sonneneinstrahlung und Wind sind von der örtlichen Situierung der Stadt abhängig. An den Eigenschaften der urbanen Oberfläche, kann hingegen durch Planung und Wahl passender Materialien aktiv Einfluss genommen werden.

Trifft Sonnenstrahlung auf ein Material, so erwärmt sich dessen Oberfläche. Zu warme Oberflächen können beim Menschen thermisches Unbehagen verursachen. Plane Oberflächen und massive Baumaterialien wirken als gute Absorptionsflächen, wärmen die Luft um sie herum deutlich auf und halten diese Temperaturen auch durch die Nacht. Der beschriebene Prozess führt zur Bildung von sogenannten städtischen Wärmeinseln (Pitha u. a., 2013). Ländliche Regionen sind dadurch nicht betroffen, da Wasserverdunstung durch unversiegelte Böden und Luftaustausch ungehindert die Temperatur senken können (Bundesministerium Verkehr Innovation und Technologie, 2018).

Nicht nur Überhitzung ist ein aktuelles Problem in Städten, sondern auch die Feinstaubbelastung. Dabei sind Feinstaubpartikel mit einem Durchmesser kleiner als 10 µm besonders gefährlich, da diese tief in die menschliche Lunge vordringen können. Basierend auf europäischen Richtlinien zur Luftreinhaltung, beträgt der Tagesgrenzwert dieser Art der Feinstaubbelastung 50 µg/m³ und darf maximal an 25 Tagen im Jahr überschritten werden. Graz überschritt im Jahr 2018 als am schlechtesten abschneidende Stadt Österreichs an 39 Tagen diesen Grenzwert. (Umweltbundesamt, 2019b)

Eine Methode der städtischen Überhitzung und Feinstaubbelastung entgegenzuwirken ist das Begrünen von Gebäuden, beziehungsweise das Einbinden von Grünraum in die Wohnumgebung. Dies kann bautechnisch in die Fassade und das Dach in Form extensiver und intensiver Begrünungen mit Humusuntergrund, bzw. Fassadenbegrünungen mit entsprechender Unterkonstruktion eingebunden

werden. Neben Fassaden von Gebäuden bieten Infrastrukturbauwerke wie Stützmauern, Lärmschutzwände, Stützen, Verkehrswege, etc. Flächen, die für eine Begrünung genutzt werden können. Zur urbanen Begrünung werden verschiedenste Pflanzen verwendet, deren Auswahl von Faktoren wie Ästhetik, Kosten, Pflegeaufwand und Feinstaubaufnahme bestimmt wird. Eine Pflanze, die sich in Hinsicht auf alle diese Faktoren sehr gut eignet, ist Moos. Ein Moospolster mit einem Quadratmeter Fläche hat circa fünf Millionen Blätter, die durch ihre negative, elektrostatische Ladung positiv geladene Mikropartikel aus der Luft anziehen, diese in Wasser gelöst aufnehmen und als Nährstoff verwerten. Dazu zählen auch die Ammoniumionen, welche im Durchschnitt 40 Prozent des Feinstaubes ausmachen. Bei Labortests der Universität Bonn konnten ein Quadratmeter große Moospolster innerhalb von Stunden bis zu 20 Gramm Feinstaub aufnehmen. Im Vergleich dazu beträgt die Feinstaubbelastung einer viel befahrenen Straße im Jahr circa 14 Gramm pro Quadratmeter Boden. (Frahm, 2007)

Ein weiterer Vorteil des Moores im Vergleich zu anderen Pflanzen ist der geringe Pflegeaufwand. Moos besitzt keine Wurzeln, es nimmt Feuchtigkeit und Nährstoffe über seine gesamte Oberfläche auf. Es ist daher nicht auf Wasserzufuhr vom Untergrund angewiesen, sondern bezieht dieses hauptsächlich über die Umgebungsluft in Form von Nebel, Tau und Regen. Dadurch muss es nicht regelmäßig gegossen, bzw. gepflegt werden. Im Rahmen einer Studie zur Analyse der allgemeinen Moosflora und deren Standort wurden im Wiener Stadtgebiet 351 verschiedene Moosarten aufgelistet. Das Klima in der Stadt ist somit für Mooswachstum geeignet. Unter den natürlich besiedelten Flächen des Moores findet sich auch Beton. (Zechmeister, 2009)

1.1 Aufgabenstellung

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Biologie der Karl-Franzens-Universität Graz sollen vier verschiedene Variationen von Betonplatten im Botanischen Garten der Universität Graz mit Moosen bepflanzt und ausgelagert werden. Das Mooswachstum soll über mehrere Monate verfolgt und dokumentiert werden. Die Betone sollen durch Messungen und Analysen am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung hinsichtlich ihrer Eigenschaften als Moossubstrat eingeschätzt werden.

Moose unterscheiden sich maßgeblich von Blütenpflanzen hinsichtlich ihrer Verankerung im Untergrund und ihres Trockenverhaltens. Moose haben keine Wurzeln, sondern Rhizoide, also haarförmig wachsende Zellen, welche zur Verankerung am Substrat dienen. Bei längerem Feuchtigkeitsentzug gehen sie in einen scheinbaren Zustand über und überstehen auf diese Art Trockenphasen. Werden diese trockenen Moose wiederbefeuchtet, gehen sie wieder in einen Stoffwechselaktiven Zustand über, dieses Verhalten wird als poikilohydrisch bezeichnet. (Frahm, 2006)

Durch diese Eigenschaften eignet sich Moos potenziell für den Bewuchs auf Beton. Einerseits kann durch das Fehlen von Wurzeln der Beton direkt vom Moos bewachsen werden, ohne dass dieser oberflächlich durch Wurzeln zerstört wird, andererseits führt das poikilohydrische Verhalten dazu, dass das Moos längere Trockenphasen am Beton überstehen kann.

Ein geeigneter Lebensraum für Mooswachstum hängt laut den Zeigerwerten von vier Faktoren (Ellenberg u. a., 2001; Landolt u. a., 2010) ab:

- Lichtzahl

Diese beschreibt das Vorkommen des Moores in Bezug auf die relative Beleuchtungsstärke.

- Temperaturzahl

Beschreibt das Vorkommen des Moores bezogen auf die vorherrschende Temperatur.

- Feuchtezahl

Diese beschreibt das Vorkommen des Moores in Bezug auf die auftretende Feuchtigkeit, bzw. die Häufigkeit einer Austrocknung des vorhandenen Substrates.

- Reaktionszahl

Beschreibt das Vorkommen des Moores im Zusammenhang mit der Bodenreaktion, also dem pH-Wert des Substrates.

Von den Zeigerwerten Lichtzahl, Temperaturzahl und Feuchtezahl lassen sich die in Tabelle 1-1 dargestellten vom Standort abhängigen Kennwerte für Mooswachstum ableiten:

Tabelle 1-1: Kennwerte Standortfaktoren

Bezeichnung	Methode	Kenngröße	Einheit	Kommentar
Temperaturzahl	Datenlogger	Umgebungstemperatur	°C	
Lichtzahl		Sonnenintensität	Wh/m ²	Wurde nicht gemessen
Feuchtezahl	Datenlogger	Relative Luftfeuchte	%	

Um ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis hinsichtlich der Standortfaktoren zu erhalten, wurden bei der Auslagerung der Betonplatten im Botanischen Garten der Universität Graz die mit Moos besiedelten Betonproben einerseits schattig (niedrige Lichtzahl, niedrige Temperaturzahl), andererseits sonnig (hohe Lichtzahl, hohe Temperaturzahl) gelagert.

Einleitung

Die in Tabelle 1-2 dargestellten betonspezifischen Kennwerte wurden von den Zeigerwerten Feuchtezahl und Reaktionszahl hergeleitet. Zusätzlich dazu wurde die mechanische Belastbarkeit und die Oberflächenrauigkeit des Betons gemessen.

Tabelle 1-2: Kennwerte betonspezifischer Eigenschaften

Bezeichnung	Methode	Kenngröße	Einheit
Mechanische Belastbarkeit	Biegezugfestigkeitsprüfung	Biegezugfestigkeit	MPa
Oberflächenrauigkeit	Sandflächenverfahren	Rautiefe	mm
	Mikroskopie	Einzelrautiefe	mm
Feuchtezahl	Kapillare Wasseraufnahme	Wasseraufnahmekoeffizient	$\text{g/m}^2\text{s}^{0.5}$
		Gesamte Wasseraufnahme nach 24 h	%
	Porositätsbestimmung	Rohdichte	kg/m^3
		Reindichte	kg/m^3
		Offene Porosität	%
		Gesamtporosität	%
		Gesamtwasseraufnahme	%
	Absorptionsisotherme	Wasseranteil im Probekörper	%
Reaktionszahl	pH Messung über den Querschnitt	Karbonatisierungstiefe	mm
	pH Diffusionsprüfung	Senkung der Oberflächen pH-Werts	

Anhand der fortlaufenden Messungen an den im Botanischen Garten der Universität Graz ausgelagerten Proben wurden die in Tabelle 1-3 angeführten Kenngrößen dokumentiert.

Tabelle 1-3: Kenngrößen der Messung an den ausgelagerten Proben

Bezeichnung	Methode	Kenngröße	Einheit
Bestimmung der Moosfläche	Optische Bildanalyse	Mooszuwachs aller Moosarten	%
		Wachstum der Moosarten	%
Oberflächenfeuchtemessung und Durchfeuchtung	Wirbelstrommessung	Feuchtigkeit der Oberseite	%
		Feuchtigkeit der Unterseite	%

1.2 Zielsetzung

Die Ergebnisse aus der Dokumentation der Auslagerung im Botanischen Garten der Universität Graz und die Ergebnisse der Analyse der betonspezifischen Eigenschaften sollen zusammengeführt und unter Berücksichtigung der Standortfaktoren eine Aussage zu dem Wachstumsverhalten von Moosen in Abhängigkeit der Eigenschaften des Betons getroffen werden.

2 Stand der Technik und Wissenschaft

Natürlicher Moosbewuchs findet im urbanen Gebiet nur auf geeignetem Substrat und bei günstigen Umgebungsbedingungen statt. In diesem Kapitel sollen einige Projekte und aktuelle Studien zum künstlich geförderten Moosbewuchs in Städten analysiert und aufgelistet werden. Außerdem werden die für den Bewuchs auf einer nährstoffarmen Oberfläche, wie Beton, relevanten Eigenschaften des Moores beschrieben.

2.1 Projekte zu urbanem Moosbewuchs

2.1.1 Sondierung für die Entwicklung von moosbewachsenen Gebäudefassadenpaneelen

Das Projekt „Sondierung für die Entwicklung von moosbewachsenen Gebäudefassadenpaneelen“, kurz BeMoFa, ist ein im Jahr 2014/15 durchgeführtes, von der Österreichischen Förderungsgesellschaft FFG gefördertes und mit einer Kooperation der technischen Universität Wien und der höheren Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Gartenbau Schönbrunn durchgeführtes Projekt. (Pont u. a., 2018)

Im Rahmen dieses Projekts wurden 43 Trägerpaneele (siehe Abb. 2-1) aus unterschiedlichem Material verwendet. Diese Paneele wurden in unterschiedlichen Größen gelocht und auf eine mit Substrat gefüllte Unterkonstruktion verbaut. Über das Substrat wurde ein Fließ verbaut, welches als Grundgerüst fungiert. Dadurch entstanden 65 verschiedene Versuchsflächen. Die Paneele wurden mit jeweils drei bis vier unterschiedlichen Substraten befüllt, diese sollen eine Wasserspeicher- und Durchlüftungsfunktion erfüllen. (Pont u. a., 2018)



Abb. 2-1: Bestandteile der Paneele: a...Granulat, b...Fließ, c...Metall-Grundgerüst (Pont u. a., 2018)

Die verwendeten Substrate sind:

- Senoplant (pH-Wert 7,1)
- Stockosorb ® (pH-Wert 7,0-8,0)
- Geohumus (pH-Wert 6,0-7,0)
- Lehm/Ton (pH-Wert 4,0-5,0)

Es wurden 12 verschiedene Moose in den gelochten Paneelen angepflanzt:

- *Tortula muralis*
- *Syntrichia ruralis* s.l.
- *Grimmia* sp.
- *Bryum argenteum*
- *Leucodon sciuroides*
- *Abietinella abietina*
- *Anomodon viticulosus*
- *Homalothecium lutescens*
- *Homalothecium sericeum*
- *Ctendidium molluscum*
- *Hypnum cupressiforme*
- *Pleurozium schreberi*

Die Bepflanzung der Paneele erfolgte auf drei Methoden:

- Bepflanzung mit Sprossen

Dabei werden ganze Stämmchen des Moores in die Paneellöcher eingebracht.

- Aufbringen einer Moosfragmente-Kleister-Mischung

Für diese Methode wurden die Moospolster zermahlen und mit Kleister vermischt, bevor sie auf die Löcher in den Paneelen aufgetragen wurden.

- Auflegen oder Einbringen ganzer Moospolster

Bei Paneelen mit großen Löchern wurden ganze Moospolster eingebracht.

Innerhalb des Versuchszeitraums starb ein Großteil der Moose ab. In Hinsicht auf das Substrat war die Bepflanzung auf Lehm/Ton besonders erfolgreich. Die Bepflanzung mit ganzen Moos sprossen und Polster zeigt zudem bessern Erfolg als die mit zerkleinertem Moos in einer Kleistermischung. Es stellte sich heraus, dass der Großteil der Metall-Grundgerüste, sowie auch Kunststoff-Paneele nicht

als Trägermaterial geeignet sind. Anders verhielten sich die verwendeten, silikatischen Materialien. Eine entscheidende Rolle hatte dabei ihre chemische Zusammensetzung und ihre Rauigkeit zurückzuführen ist. Speziell die Arten *Hypnum cupressiforme*, *Homalothecium sp.* und *Abietinella abietina* wiesen in dem Projekt eine hohe Vitalität auf. (Pont u. a., 2018)

2.1.2 Projekt Algen, Flechten, Moose und Farne auf Fassaden

Im Rahmen dieses Projekts wurden 2003 vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) biologische und chemisch-physikalische Vorgänge von Aufwuchs an Fassaden untersucht und dokumentiert. Dies umfasst mehr als 80 verschiedene Algen, Flechten, Moose und Farne. Die untersuchten Objekte verteilen sich auf den Süddeutschen Raum, von Stuttgart bis nach Berlin. Es wurden auf vereinzelt Objekte aus Westösterreich, der Schweiz und dem Norddeutschen Raum betrachtet. Die untersuchten Substrate sind unverputzte Betonwände, Natursteinwände und moderne Fassaden. Der betrachtete Teil der Fassade ist ein 30x30 cm großer Ausschnitt. (Hofbauer u. a., 2003)

Es wird hier nur die tabellarische Auswertung der Moose betrachtet. (siehe Tabelle 2-1)

Tabelle 2-1: Beobachtete Arten von Moosen (Hofbauer u. a., 2003)

Lateinischer Name Deutscher Name	Außenbauteil-Substrat	Verbreitung allgemein aus Literatur
<i>Bryum argenteum</i> Hedw Silbernes Birnmoos	Häufig, verschiedene Bauteiloberflächen	weltweit
<i>Ceratodon purpureus</i> (Hedw.) Brid. Hornzahnmoos	Dächer und Pflastersteine, auch Spalten in älteren Fassaden	Europa
<i>Encalypta streptocarpa</i> Hedw Gedrehtes Glockenhutmoos	Häufig, Ältere Mauern, auch Mörtel	Europa
<i>Grimmia pulvinata</i> (Hedw.) Sm. Kissenmoos	Häufig, verschiedene Bauteiloberflächen	Europa
<i>Hypnum cupressiforme</i> Hedw Zypressen-Schlafmoos	Erstmals von Außenbauteil, unverputzte Betonwand	Europa
<i>Orthotrichum anomalum</i> Hedw Stein-Steifblattmoos	Häufig, verschiedene Bauteiloberflächen	Europa
<i>Schistidium apocarpum</i> (Hedw.) B.S.G Gemeines Spaltmoos	Häufig, Verschiedene Bauteiloberflächen	Europa
<i>Tortella tortouosa</i> (Hedw.) Limpr Echtes Kräuselmoos	Natursteinwände, aber auch auf verputzten Fassaden an Fehlstellen	Europa
<i>Tortula muralis</i> Hedw Mauer-Drehzahnmoos	Häufig, verschiedene Bauteiloberflächen	Europa
<i>Tortula ruralis</i> (Hedw.) Gaertn., Meyer & Scherb. Erd-Bartmoos	Verschiedene Bauteiloberflächen, besonders Dächer	Europa

2.1.3 CityTree

Ein derzeit aktuelles Produkt der im Jahr 2014 gegründeten, deutschen Start-Up Firma Green City Solutions ist der City Tree (Abb. 2-2).



Abb. 2-2: City Tree (Green City Solutions, 2018)

Es handelt sich dabei um eine 3 Meter breite und 4 Meter hohe Wand, welche beidseitig mit Moosen bedeckt ist. Die Standfüße der Wand können als Sitzgelegenheiten genutzt werden. Laut Hersteller ist nach der Installation des City Trees keine weitere Pflege notwendig. Mit ausreichend Feuchtigkeit werden die Moose von einem 1,4 m³ Wassertank versorgt, welcher über eine solarbetriebene Sensorik gesteuert wird. Sollte der Wassertank zu Ende gehen, wird über Internetkommunikation das Serviceteam kontaktiert. In der Konstruktion verbaute Ventilatoren können zur zusätzlichen Durchströmung der Wand verwendet werden.(Funk, 2015)

Mit dem City Tree sollen Bushaltestellen und Wartezonen ausgestattet werden. Eine Mooswand bindet laut Hersteller jährlich 73 kg Feinstaub und wandelt diese in Biomasse um.(Funk, 2015)

2.1.4 Biological Concrete

Die Structural Technology Group der polytechnischen Universität Katalonien (UPC) hat ein mehrschichtiges, betonbasiertes Fassadenelement entwickelt und patentiert. Dabei wird herkömmlicher Portlandzement in der Tragstruktur verwendet und Magnesiumphosphatzement in einer äußeren separaten Schicht.

Das gesamte System besteht aus der Tragstruktur und drei darauf aufgetragenen Schichten, welche das Wachstum von Flechten und Moosen gewährleisten sollen. Frischer, unkarbonatisierter Beton hat einen pH-Wert von ca. 12,5, daher wurde die unterste Schicht der Fassadenplatte, die Tragstruktur aus Portlandzementbeton karbonatisiert, um einen pH-Wert von ca. 8 zu gewährleisten.

Auf die Tragstruktur ist ein Abdichtungsmaterial aufgebracht, welches ein Eindringen von Wasser in diese verhindern soll.

Die nächste Schicht ist der Magnesiumphosphatzementbasierte Beton. Dieser Beton hat einen leicht sauren pH-Wert und wirkt als Wasserspeicher für die Konstruktion, dies soll das Wachstum der Flechten und Moose bewerkstelligen.

Die oberste Schicht ist einerseits in Richtung der Konstruktion wasserdurchlässig und in die andere wasserdicht. Durch diese Schicht kann Wasser in dem Magnesiumphosphatzementbasierte Beton aufgenommen werden und an gewünschten Stellen abgegeben werden. (Universität Politècnica de Catalunya (UPC), 2012)

Dieses neue Material soll laut dem Entwicklerteam umwelttechnische, thermische und ästhetische Vorteile mit sich bringen. Umwelttechnisch sollen die auf den Fassadenelementen wachsenden Flechten und Moose das atmosphärische CO₂ binden. Vom gebäudetechnisch thermischen Standpunkt aus, verhindert der Pflanzenbewuchs eine Überhitzung des Gebäudes. Ästhetisch verändert sich die Farbe des Bewuchses je nach Jahreszeit, wie die Simulation in Abb. 2-3 zeigt.(Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2012)



Abb. 2-3: Simulation des Fassadenbewuchses des Aeronautical Cultural Centre in El Prat de Llobregat (Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2012)

2.1.5 Mooswand Stuttgart

Am 27.02.2017 wurde in Baden-Württemberg, Stuttgart mit dem Aufbau einer Mooschicht auf einer bestehenden Schallschutzwand begonnen. Diese liegt direkt an der B14, einer stark befahrenen Straße der Stadt. Die in Abb. 2-1 dargestellte Mooswand ist 100 Meter lang und drei Meter hoch. Die Moose wuchsen auf Vliesmatten, welche an der Unterkonstruktion befestigt wurden. Die verwendeten Moosarten sind Glashaar-Frauenhaarmoos (*Polytrichum piliferum*), Kaktusmoos (*Campylopus introflexus*), Zypressenschlafmoos (*Hypnum cupressiforme*), Wacholder-Frauenhaarmoos (*Polytrichum juniperinum*), und graues Zackenmützenmoos (*Racomitrium canescens*). All diese Moose wachsen in lichtreichen, trockenen Standorten vorkommen. Der Aufbau der Mooswand wurde vom Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (Universität Stuttgart), Feinstaubmessung vom Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (Universität Stuttgart) durchgeführt und die biologischen Untersuchungen führte das staatliche Museum für Naturkunde Stuttgart durch. (SMNStuttgart, 2017)



Abb. 2-4: Mooswand Stuttgart (SMNStuttgart, 2017)

Da Moos keine Wurzeln hat, nimmt es über seine gesamte Oberfläche Feuchtigkeit und Nährstoffe auf. Da die Schallschutzwand in Richtung Süden ausgerichtet ist und das darauf befindliche Moos sonst schnell austrocknen würde, wurde eine Bewässerung in Form einer Wasserleitung mit Spritzdüsen angebracht. (Götz, 2017)

Die Mooswand wurde am 23.04.2018 abgebaut. Schon während des Projekts wurden abgestorbene Moosstücke ausgetauscht. Das Austrocknen des Moores konnte trotz künstlicher Bewässerung und nachträglich angebaute Beschattung (siehe Abb. 2-5) nicht vor dem Absterben bewahrt werden. (Schwarz, 2018)



Abb. 2-5: Mooswand mit Sonnenschutz (Schwarz, 2018)

Die Gesamtkosten der Mooswand belaufen sich nach dem Abbau (siehe Abb. 2-6) auf ca. 1600 €/m². Bis Ende Juni 2018 wurde mit den Feinstaubmessungen neben der B14 noch fortgefahren werden. Die bis dato veröffentlichten Feinstaubmesswerte sind zwar unter denen ohne Mooswand, diese bewegen sich allerdings in der Messtoleranz der Messgeräte. Die Stickoxidbelastungsreduzierung hingegen konnte nachgewiesen werden. (Südwestrundfunk, 2018)



Abb. 2-6: Mooswand nach Abbau (Südwestrundfunk, 2018)

Die Erkenntnisse dieses Versuches zeigen, dass direkte Sonneneinstrahlung zu schneller Austrocknung und Strahlungsschäden am Moos führen. Zudem ist Austrocknung infolge des Fahrtwindes ein ausschlaggebender Faktor. Entgegenwirken kann man diesen Faktoren mit einer geneigten (60-70°) Wand, welche absonnig und von der Straße abgewandt steht und zusätzlich mit einer Bewässerung mit hohem Druck befeuchtet wird. (Nebel, 2018)

2.2 Wachstumseigenschaften des Moooses

2.2.1 Physiologie

2.2.1.1 Wasseraufnahme, Wasserleitung und Wasserspeicherung

Grundsätzlich entwickelten sich zwei Strategien der grünen Landpflanzen für den Umgang mit der Umgebungsfeuchte:

Pflanzen, die ihren internen Wasserhaushalt so regeln, dass er unabhängig von der äußeren Atmosphäre weitestgehend konstant bleibt, bezeichnet man als homoiohydrisch Spektrum Akademischer Verlag, (2001a). Fast alle Kormophyten, also Farn- und Samenpflanzen, sind homoiohydrisch. Sie beziehen Wasser und Nährstoffe über ihre Wurzeln aus dem Boden, die innere Weiterleitung zu den Blättern erfolgt in weiterer Folge über Transpirationssog. In morphologisch-anatomischer Hinsicht erfordert diese Strategie Abschlussgewebe, Stomata und Leitgewebe, sowie entweder eine dauernde Wasserverfügbarkeit oder eine entsprechende Wasserspeichermöglichkeit. Bei sonnigem Wetter führt diese Strategie zu hohem Wasserverlust und in weiterer Folge zu Wasserstress. (Frahm, 2001)

Im Gegensatz dazu bezeichnet man Pflanzen die ihren inneren Wasserhaushalt an die äußere Atmosphäre anpassen als poikilohydrisch Spektrum Akademischer Verlag (2001c). Zu diesen zählen Thallophyten, also Luftalgen und Flechten, sowie Bryophyten, also Moose. Die Stoffwechselaktivität dieser Pflanzen beschränkt sich auf die Phasen, in denen sie befeuchtet sind. Dieses Verhalten wird als poikilohydrisch bezeichnet. Dieses poikilohydrische Verhalten erlaubt es ihnen, im Falle einer Austrocknung in einen scheinbaren toten Zustand überzugehen und bei Wiederbefeuchtung wieder stoffwechselaktiv zu werden Frahm (2006). Dadurch tritt kein Wasserstress auf und es können auch für Kormophyten weitestgehend ungeeignete Standorte, wie Fels und Borke besiedelt werden. (Frahm, 2001)

Bei Bryophyten erfolgt die Wasseraufnahme über ihre gesamte Oberfläche, in Form von Bodenwasser, Tau, Regen und der Luftfeuchtigkeit. Die Aufnahme des Wassers durch die Luftfeuchte ist von den osmotischen Werten der Mooszellen abhängig, welche artenabhängig, sowie Standortabhängig sind. Bei Geländebeobachtungen konnte Frahm feststellen, dass die meisten Moose bei einer relativen Luftfeuchte von größer 80% ihre Verdunstungsverluste durch Wasserdampfaufnahme abdecken konnten. (Frahm, 2001)

Buch unterteilt die Moose nach der Art ihrer Wasserleitung in ektohydrische und endohydrische (Buch, 1945):

Bei ektohydrischen Moosen findet hauptsächlich oberflächliche Wasserleitung statt. Sie nehmen Wasser über ihre gesamte Oberfläche auf, haben aber im Stämmchenquerschnitt keine, bzw. stark reduzierte wasserleitende Strukturen. Ektohydrische Moose erreichen bei Wasserkontakt in wenigen Sekunden ihre Turgeszenz. Dies ist bei trockenen Gegebenheiten, wo das Moos nach der Befuchtung schnell wieder austrocknet und daher möglichst schnell Stoffwechselaktiv sein muss, besonders wichtig.

Endohydrische Moose hingegen haben wasserleitende Elemente in den Stämmchen, sowie auch in den Rippen der Blätter. Im Vergleich zu den ektohydrischen Moosen werden die endohydrischen weniger leicht turgeszent, was auf die Bildung eines schwachen wachsartigen Überzugs (Kutikula) zurückzuführen ist. Das Wasser wird weitestgehend durch die Rhizoide aufgenommen und im Stämmchen weitergeleitet.

Die Wasserleitungsmechanismen der Moose gliedern sich auf innere und äußere Wasserleitung auf (Frahm, 2001):

- Innere Wasserleitung:
 - Apoplastisch (durch die Zellwände)
Dabei wird z.B. kapillar aufsteigendes Wasser in das Blatt aufgenommen und im Blatt weitertransportiert.
 - Symplastisch (durch Wasserleitung über Plasmabrücken von Zelle zu Zelle)
Diese tritt bei dünnwandigen parenchymatischen Geweben auf.
 - Hydroiden (wasserleitende Zellen)
Diese Zellen sind abgestorben, haben einen engen inneren Durchmesser, sind verlängert und haben schräge Endwände.
 - In Sonderfällen erfolgt die Wasserleitung über Zellen und sind mit Poren, welche einen großen inneren Durchmesser aufweisen, verbunden. Dies führt zu einer effektiven inneren Wasserleitung, sowie Speicherung
- Äußere Wasserleitung:
 - Kapillare Leitung zwischen den Blättern
 - Kapillare Leitung zwischen Blattgrund und Stämmchen
 - Kapillare Leitung zwischen Rhizoiden und Paraphyllien
 - Kapillare Leitung auf der Blattoberfläche

Hinsichtlich der Austrocknung von Moosen wurden von Abel Versuche durchgeführt, bei denen er verschiedene Arten verschieden lange verschiedener relativen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt hat und diese anschließend auf deren Vitalität prüfte. Die Einteilung der Moose erfolgte in drei Gruppen: Hygrophyten, die schon nach kurzzeitiger Austrocknung geschädigt werden. Mesophyten, die die Austrocknung kurze Zeit ertrugen und Xerophyten, die auch nach längerer Austrocknung ohne Schädigung überstanden. Mit dieser Trockenresistenz ist zudem die Schnelligkeit verbunden, mit welcher nach Befeuchtung wieder Fotosynthese betrieben wird. (Abel, 1956; Frahm, 2001)

Eine optimale Photosynthese tritt bei optimalem Wassergehalt des Moooses ein. Das Maß der Photosynthese steigt mit dem Maß des Wassergehalts der Pflanze bis zu einem gewissen Punkt, ab welchen es wieder abfällt. Dies ist auf eine Oberflächenbenetzung des Moooses bei Wasserübersättigung zurückzuführen, welche den Gasaustausch behindert. Bei Hygrophyten ist der Wassergehaltsumschlagpunkt bei 1000% des Trockengewichts, bei Xerophyten bei 200% erreicht. Diese Sättigungsphasen sind maßgeblich von der Verdunstung und weitergehend von der umgebenden Luftfeuchte und Temperatur abhängig. (Frahm, 2001)

Verdunstungshemmende Strukturen von Moosen sind (Frahm, 2001):

- Kutikula
Diese Wachsschicht auf dem Moos kann die Verdunstung auf den Blättern herabsetzen.
- Rollblätter
Die Blattränder des Moooses rollen sich ein, um die Verdunstungsfläche zu verkleinern.
- Einrichtungen, die Sonneneinstrahlung reduzieren können, z.B. Glashaare.

2.2.1.2 Temperatureinfluss

Die Temperatur beeinflusst, abgesehen von der Frost- und Hitzeresistenz, wesentlich die Photosyntheserate. In temperaten Gebieten, also in gemäßigten Breiten, liegt die optimale Photosyntheserate bei 15-20°C. (Frahm, 2001)

Der Wassergehalt und die Geschwindigkeit des Einfrierens haben maßgeblichen Einfluss auf die Frostbeständigkeit des Moores. So wurden feuchte Moore auf -10°C temperiert, was diese zum Absterben brachte. Hingegen wurde bei auf 35% relative Luftfeuchtigkeit vorgetrocknetes Moos beobachtet, dass dies eine Abkühlung auf -35°C tolerierte. Moos, welches absolut vorgetrocknet wurde, überlebt Einfrieren in flüssigen Stickstoff bei -196°C. Es besteht kein Zusammenhang zwischen der Jahreszeit und der Frostresistenz, allerdings korreliert die Frost- und Hitzeresistenz. So haben wenig Frostresistente Moore auch eine niedrige Toleranz zu Hitze.

Auch die Hitzeresistenz der Moore ist von deren Feuchtigkeit abhängig. Bei der Hitzeuntersuchung von stark ausgetrockneten Moosarten ertrugen alle Arten zumindest 65°C. Die mesophytischen Arten ertrugen bis zu 80-90°C und die xerophytischen bis zu 100-110°C (Lange, 1955). Nörr gab hingegen eine Obergrenze für befeuchtete Pflanzen von 42-51°C an und 85-110°C für trockene (Nörr, 1974).

2.2.1.3 Lichteinfluss

Eine Lichtsättigung der von Proctor untersuchten Moosarten wird bei 10-20 Klx erreicht, was bei Waldmoosen bis auf 40 Klx steigen kann und bei Schattenpflanzen auf 2-3 Klx abfallen kann. Der Kompensationspunkt ist temperaturabhängig und beträgt bei den meisten untersuchten Arten bei 5°C zwischen 160 und 620 lx. Dieser steigt sich bei 25°C auf 740- 1930 lx und bei 15°C liegt er bei 1 bis 6 lx. Im turgeszenten, photosynthetisch aktiven Zustand beginnen die Moore ab 40- 50°C abzusterben. (Proctor, 1990)

2.2.1.4 Substrat

Moore haben spezifische Ansprüche hinsichtlich ihres Substrats, speziell den pH-Wert betreffend. Es gibt einige ubiquitäre Moore, welche auf saurem, wie auch basischem Substrat vorkommen. Die meisten Moore haben sich aber auf entweder saure Untergründe, bzw. auf basische, wie Kalkstein, spezialisiert. Dabei haben Kulturversuche gezeigt, dass für den Mineralstoffwechsel auf jedem Substrat ein ausgewogenes Verhältnis von Kalium, Kalzium und Magnesium vorhanden sein muss. (Frahm, 2001)

2.2.2 Nährstoffaufnahme

Kormophyten beziehen Wasser und Nährstoffe aus dem Boden über Wurzeln. Moose hingegen nehmen Nährstoffe gelöst in dem Wasser auf, welches sie über ihre gesamte Oberfläche aufnehmen. Dies betrifft nicht nur Moose, welche in stark feuchter Umgebung, wie bei Flüssen und Seen, sondern auch in trockenerer Umgebung vorkommen. Moose nehmen generell Nährstoffe gebunden in atmosphärischen Niederschlägen, also Nebel, Tau und Regen auf und nicht aus dem Substrat. In der Atmosphäre binden sich Stickoxide mit Regenwasser z.B. zu salpetriger Säure, bzw. Salpetersäure, oder mit Ammoniak zu Ammoniumnitrat. Aus diesen Verbindungen kann das Moos Stickstoff aufnehmen, was wie Dünger wirkt. (Frahm, 2006)

Die Aufnahme der Nährstoffe, bzw. der Mineralstoffe erfolgt laut Frahm in drei Schritten (Frahm, 2001; 2006):

1. Der Kationenaustausch. Die Zellwände des Moores stellen äußerlich Wasserstoffionen (H^+) zur Verfügung. Im benetzenden Regenwasser sind Nährstoffe in Form von Salzen, wie z.B. Kalium, Kalzium und Magnesium, dissoziiert, sie sind also in Anionen und Kationen zerlegt. Durch die Abgabe der Wasserstoffionen an der Zellmembran nimmt das Moos die Kationen aus dem Regenwasser auf. Durch diesen Kationenaustausch nimmt das Moos einerseits Nährstoffe auf, andererseits wird das Umgebungswasser dadurch angesäuert. So schreibt Frahm, dass durch diesen Vorgang Wasser, welches einen pH von 7 aufweist, nach Durchlaufen des Moores nur noch einen pH von 5 aufweist.
2. Durch die semipermeable Zellmembran werden die gelösten Stoffe in die Zellen innerhalb der äußeren Zellmembran aufgenommen.
3. Partikel werden in unlöslicher Form durch Pinocytose (Aufnahme flüssiger Nahrungspartikel in die Zelle, wo sie der interzellulären Verdauung zugeführt wird (Spektrum Akademischer Verlag, 2001b)) aufgenommen.

2.2.3 Umweltfaktor Moos

Die Nährstoffaufnahme über die Oberfläche des Moores (siehe 2.2.2) bedingt, dass diese, bis auf eine dünne Kutikula, schutzlos etwaigen Umwelteinflüssen ausgesetzt ist. Moose reagieren daher stark auf Wasser und Luftverschmutzung und werden oft als Bioindikatoren genutzt. So kann z.B. auf die Wasserqualität eines Gewässers durch die dort wachsenden Moosarten rückgeschlossen werden, da spezielle Moosarten spezielle Umweltbedingungen tolerieren. Aber nicht nur in Hinsicht auf Verunreinigungen indizieren Moose Veränderungen, sondern auch in Hinsicht der Temperatur und somit auch des Klimawandels. Die Verbreitung der Moose erfolgt durch Sporen, diese können sich wie Staub über hunderte Kilometer verbreiten. Solange die Umweltbedingungen für das Moos nicht geeignet sind keimen diese nicht. Dies wurde in einem finnischen Experiment nachgewiesen, in dem Regenwasser gefiltert wurde und die vorhandenen Sporen aufgekeimt wurden. Dabei sind auch in Finnland nicht vorkommende Moosarten aufgekeimt worden. Verschieben sich die Temperaturzonen, treten in Gegenden, wo vorher bestimmte Moosarten nicht heimisch waren, plötzlich diese Arten auf. (Frahm, 2006)

Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz kamen zu dem Schluss, dass Algen, Flechten und Moose, also die kryptogamen Schichten, maßgeblich das Klima beeinflussen. Sie bedecken schätzungsweise dreißig Prozent der weltweiten Landfläche und nehmen jährlich etwa 50 Milliarden Tonnen Stickstoff und 14 Milliarden Tonnen Kohlendioxid auf. Das ist etwa so viel Kohlendioxid, wie jährlich durch das Abbrennen von Wäldern und anderer Biomasse freigesetzt wird. (Elbert u. a., 2012)

Im urbanen Kontext machen 50% des Feinstaubes Ammoniumnitrat aus, weitere 2% sind organische Materialien wie Reifenabrieb und Ruß, der Rest sind Gesteinsstäube. Für Moose wirkt Ammoniumnitrat (siehe 2.2.2) wie Dünger, die organischen Mineralien können wiederum von Bakterien, die auf dem Moos leben, verarbeitet werden. Moose haben eine sehr große Oberfläche, verglichen zu dem Platz, den sie einnehmen. Der Feinstaub gelangt daher einerseits durch Wind in Kontakt mit der Moosoberfläche, andererseits haben Moose eine elektrostatische Ladung, was dazu führt, dass Staub angezogen wird. An einer viel befahrenen Straße fallen jährlich 14 Gramm Feinstaub an. Bei Laborversuchen von Frahm und Sabovljevic haben diese festgestellt, dass pro Quadratmeter Moos bis zu 20 Gramm Feinstaub aufgenommen werden kann. (Frahm & Sabovljevic, 2007; Steinlein, 2007)

2.3 Lebensraum, Charakteristik und Zeigerwerte

Eine Methode der Kategorisierung einer Pflanze hinsichtlich ihres natürlichen Lebensraums sind in der Biologie die sogenannten Zeigerwerte. In den Büchern von Landolt u. a. (2010) und Ellenberg u. a. (2001) wird der Untergrund, auf dem die Pflanze gefunden wurde, in Hinsicht auf Feuchtezahl, Reaktionszahl, Lichtzahl und Temperaturzahl kategorisiert.

Im folgenden Abschnitt sind acht Moose beschrieben, die für Auslagerungsversuche im Rahmen dieser Arbeit von Herrn Dipl.-Biol. Dr.rer.nat.habil. Christian Berg ausgewählt wurden.

2.3.1 *Tortula muralis*

Tortula muralis (siehe Abb. 2-7), oder auch Mauer-Drehzahnmoos genannt, wächst in Rasen oder Polstern auf sonnigen kalkhaltigen Felsen, Mauern und stickstoffreichen Standorten. Es bildet Sporenkapseln und häufige Wuchsbegleiter sind *Orthotrichum anomalum*, *Grimmia pulvinata*, *Schistidium crassipilum* und *Orthotrichum anomalum*. Heutzutage ist das Hauptverbreitungsgebiet der *Tortula muralis* in menschlichen Siedlungsgebieten, bis auf höhere Gebirgslagen, wo die Art auflockert. Das Mauer-Drehzahnmoos ist eine ungefährdete Art. (Meinunger & Schröder, 2007)



Abb. 2-7: *Tortula muralis*

Das Mauer-Drehzahnmoos wächst laut der Feuchtezahl in Abb. 2-8 in trockenen, teilweise aber auch sehr trockenen und frischen Gebieten. Die Feuchtezahl der Abb. 2-9 impliziert hingegen, dass *Tortula muralis* vorwiegend an Trockenstandorten vorkommt. Die Reaktionszahl, also der Indikator für das Wachstum auf basischen bzw. sauren Untergrund, gibt in beiden Büchern keine diskrete Auskunft. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass *Tortula muralis* sowohl auf basischen wie auch sauren Untergrund wächst. Abb. 2-8 zeigt eine halbschattige Lichtzahl mit einer starken, möglichen Abweichung von dieser Einschätzung. Die Pflanze wurde also sowohl in schattigen als auch in hellen Gebieten angetroffen. Abb. 2-9 zeigt eine Lichtzahl Lichtpflanze, was Indiz für eine hohe Sonnentoleranz ist. Die Temperaturzahl in beiden Büchern zeigt zumindest eine montane Wärmetoleranz, bzw. kategorisiert die Pflanze als Mäßigwärmezeiger. In Landolt u. a. (2010) wird die tolerierte Temperatur bis zu collin, warm eingestuft.

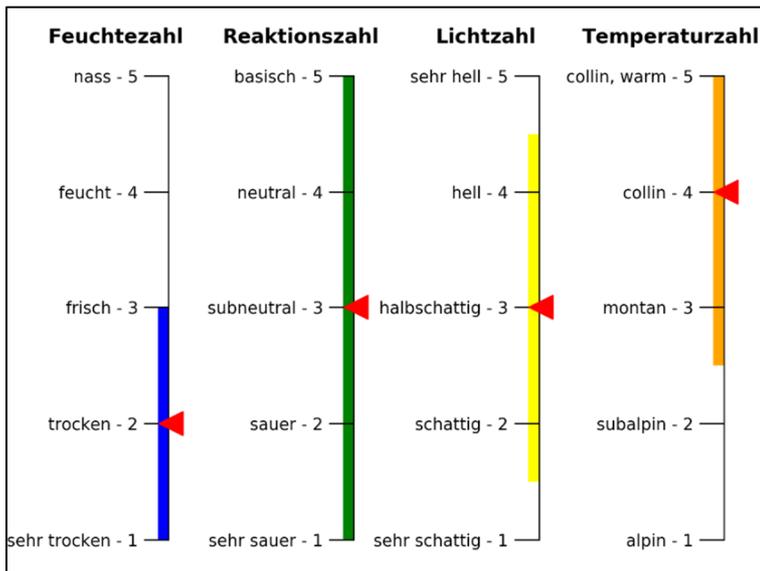


Abb. 2-8: Zeigerwerte *Tortula muralis* (Landolt u. a., 2010, mod.)

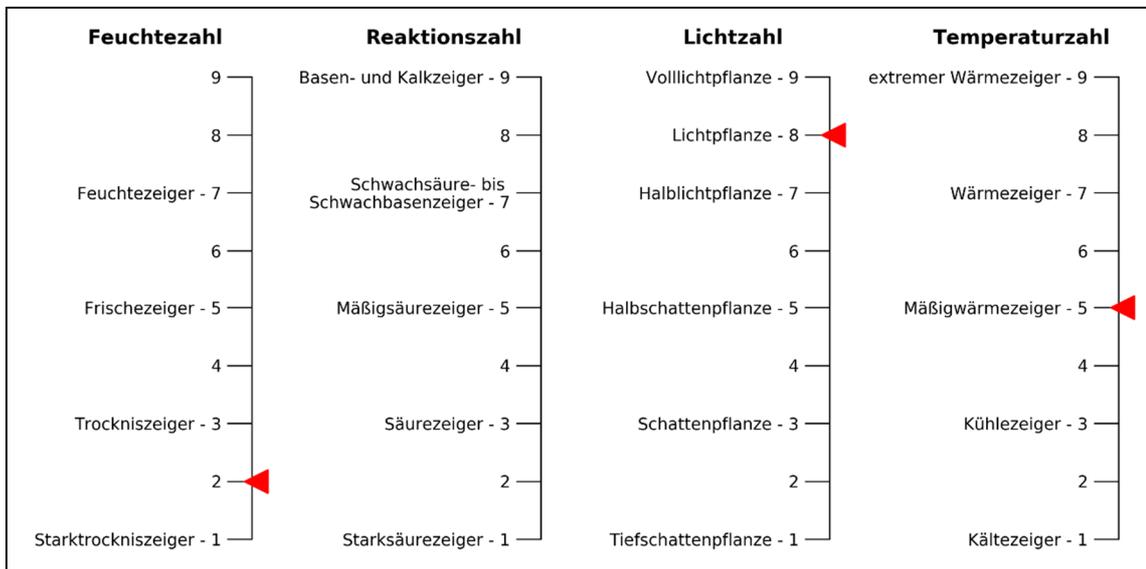


Abb. 2-9: Zeigerwerte *Tortula muralis* (Ellenberg u. a., 2001, mod.)

2.3.2 *Grimmia pulvinata*

Grimmia pulvinata (siehe Abb. 2-10), oder auch Polster-Kissenmoos, bildet dicht gewachsene, graulich grüne Polster mit Kapseln. Die Wachstums Umgebung des Polster-Kissenmooses ist meist basisch, sonnig, trocken, kalk- und nährstoffreich. So wächst es häufig an vom Menschen beeinflussten Orten wie Mauern, Randsteinen, Beton und Asphalt. Zudem wächst es aber auch auf Felsen und Gesteinsuntergründen. (Swissbryophytes, 2018)

Grimmia pulvinata ist eine ungefährdete Art und typische Begleitarten sind *Tortula muralis*, *Orthotrichum anomalum* und *Schistidium crassipilum* (Meinunger & Schröder, 2007).



Abb. 2-10: *Grimmia pulvinata*

Abb. 2-12 kategorisiert das Polster-Kissenmoos als Starkrockniszeiger. Also als Moosart, die kaum Feuchtigkeit benötigt, oft auch auf ausgetrockneten Stellen lebensfähig ist und sich auf trockene Substrate beschränkt. In Abb. 2-11 wird es als trocken, also in wenig luftfeuchter Lage, deklariert. Dazu ist zu sagen, dass dieser Wert eine leichte Ungenauigkeit berücksichtigt, was bedeutet, dass das Moos auch in frischen, bzw. in sehr trockenen Gebieten angetroffen wird. Hinsichtlich der Reaktionszahl gibt Abb. 2-11 keine diskrete Auskunft, da sie von basischen bis sehr sauren Wachstumsgrund jedes Substrat als geeignet angibt. Abb. 2-12 deklariert das Polster-Kissenmoos als Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger. Das Moos wächst also in saurer Umgebung bis zu einem pH-Wert von 6,9, aber noch nicht im neutralen Bereich. In Abb. 2-11, sowie Abb. 2-12 wird *Grimmia pulvinata* für Wachstum in heller Umgebung eingestuft. Sie tritt an sonnigen Stellen mit direkter Besonnung und 40% typischer relativer Beleuchtung auf. Der das Auftreten des Polster-Kissenmooses beschränkt sich laut Abb. 2-11 auf montanes bis collin warmes Gebiet, Abb. 2-12 hingegen beschreibt es als Mäßigwärmezeiger, was ein Auftreten der Art in höheren montanen Lagen, bis tiefe Lagen berücksichtigt.

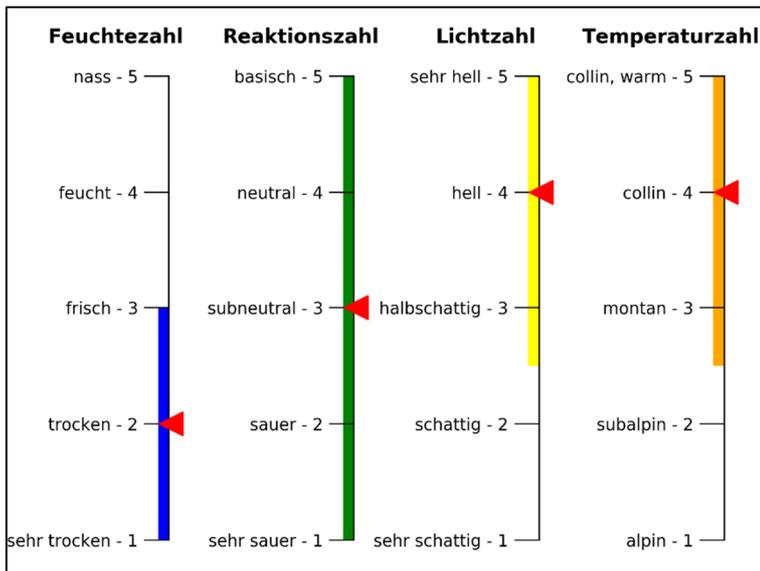


Abb. 2-11: Zeigerwerte *Grimmia pulvinata* (Landolt u. a., 2010, mod.)

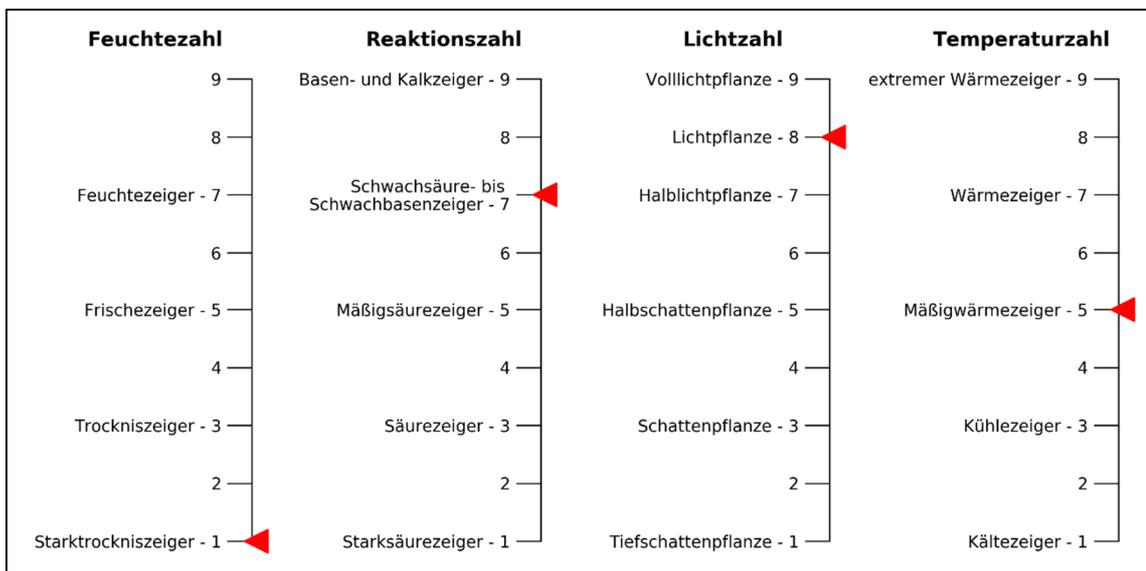


Abb. 2-12: Zeigerwerte *Grimmia pulvinata* (Ellenberg u. a., 2001, mod.)

2.3.3 Orthotrichum anomalum

Orthotrichum anomalum (siehe Abb. 2-13), auch Mauer-Goldhaarmoos genannt, bildet dunkle bis braungrüne Rasen, meist mit Kapseln. Es wächst vom Tiefland bis über die Waldgrenze, meist auf kalkhaltigen Untergründen. Ursprünglich wuchs es auf Felsen und kalkhaltigen Gestein, hat sich aber inzwischen allgemein in menschlichen Ansiedlungen ausgebreitet. So sind auch Substrate wie Mauern, Beton und mit Kalkstaub überzogene Rinde ein guter Wachstumsuntergrund für diese Moosart. Das Mauer-Goldhaarmoos tritt meist gemeinsam mit *Didymodon rigidulus*, *Schistidium crassipilum*, *Tortula muralis* und *Grimmia pulvinata* auf. *Orthotrichum anomalum* wächst meist in einzelnen Rasen zwischen den zuvor genannten Begleitarten. Das Mauer-Goldhaarmoos ist eine weit verbreitete Art und ist nicht gefährdet. (Meinunger & Schröder, 2007)



Abb. 2-13: *Orthotrichum anomalum*

Orthotrichum anomalum wird wie auch *Tortula muralis* (siehe 2.3.1) im Buch von Ellenberg als vorwiegend an Trockenstandorten vorkommend eingestuft. Im Vergleich dazu wird es laut Abb. 2-14 als trocken mit mittlerer Abweichung eingestuft, was Standorte von sehr trocken, bis beinahe feucht einschließt. Die Reaktionszahl ist laut Abb. 2-14 undefiniert, also basische, sowie auch sehr saure Standorte sind möglich. Abb. 2-15 definiert das Mauer-Goldhaarmoos als basentoleranter als *Grimmia pulvinata* (siehe 2.3.2), was ein Wachstum im pH-neutralen Bereich zulässt. Abb. 2-14 zeigt eine Lichttoleranz des Moores von sehr hellen Gebieten, bis über halbschattige Bereiche hinaus. Laut Abb. 2-15 ist *Orthotrichum anomalum* hingegen eine Volllichtpflanze, welche nur selten an Orten mit weniger als 50 % relativer Beleuchtung auftritt. Auch zur typischen Wachstumstemperatur sind die Informationen aus den Büchern von Landolt und Ellenberg von einander Abweichend. So zeigt Abb. 2-14 eine Temperaturzahl von collin warm bis über montan hinausreichend, während Abb. 2-15 das Mauer-Goldhaarmoos als Kühlezeiger einstuft, der hauptsächlich in hochmontanen Lagen, bzw. bei borealen Temperaturen vorkommt.

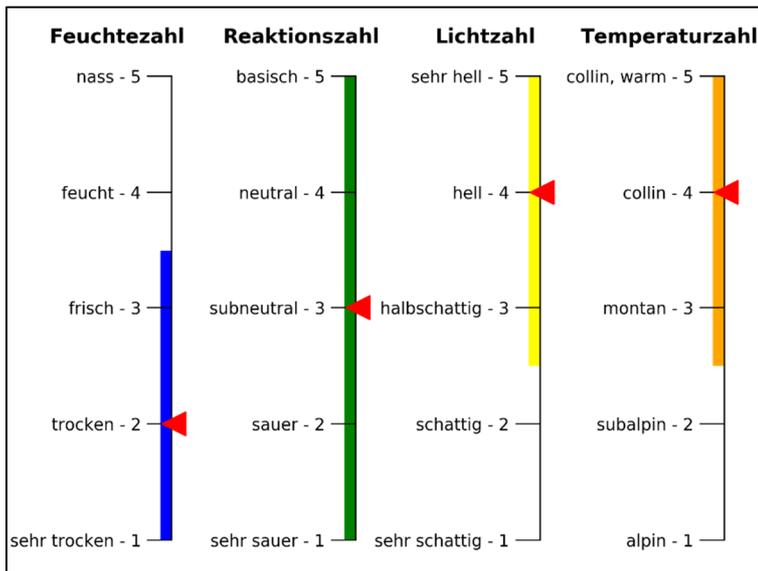


Abb. 2-14: Zeigerwerte *Orthotrichum anomalum* (Landolt u. a., 2010, mod.)

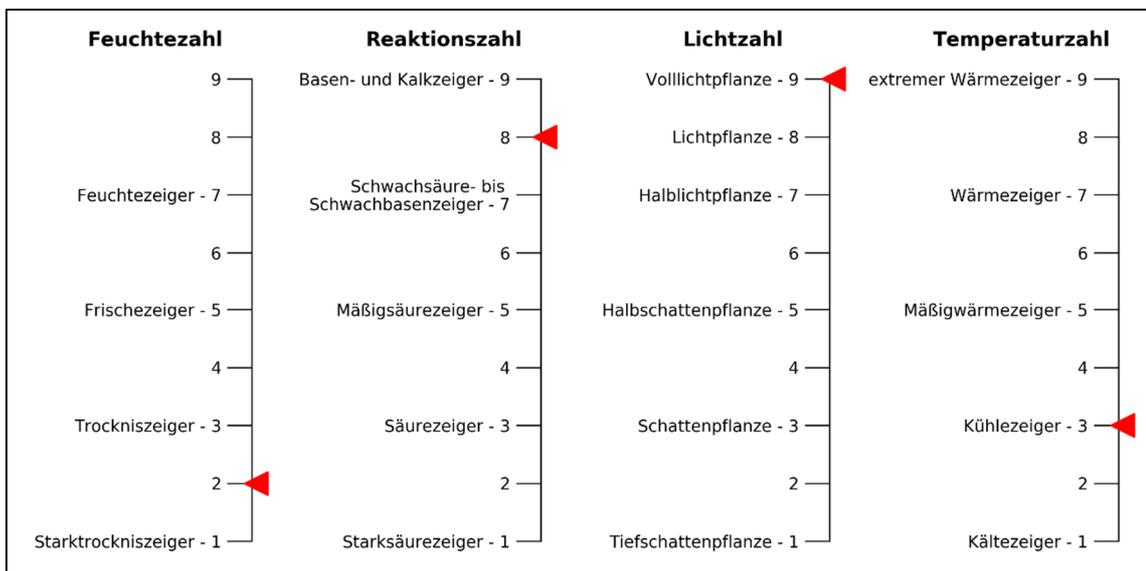


Abb. 2-15: Zeigerwerte *Orthotrichum anomalum* (Ellenberg u. a., 2001, mod.)

2.3.4 Schistidium crassipilum

Schistidium crassipilum (siehe Abb. 2-16), auch Dickhaar-Spalthütchen genannt, wächst in bräunlichen, olivgrünen büscheligen Rasen. Es besiedelt meist kalkhaltige Substrate, was natürliche Standorte wie Felsen, aber vor allem anthropogene Untergründe umfasst. Das Dickhaar-Spalthütchen tritt in Begleitung von Moosen wie *Didymodon rigidulus*, *Tortula muralis*, *Grimmia pulvinata* und *Orthotrichum anomalum* auf. Bei *Schistidium crassipilum* handelt es sich um eine ungefährdete Art. (Meinunger & Schröder, 2007)



Abb. 2-16: Schistidium crassipilum

Das Dickhaar-Spalthütchen scheint in den Zeigerwerten von Ellenberg nicht auf. In den Zeigerwerten nach Landolt wird es als typisch in Gebieten mit wenig Luftfeuchte, bzw. wenig Niederschlag auftretend, beschrieben. Wie die Reaktionszahl in Abb. 2-17 zeigt, tritt es nur in pH-neutralen, bzw. basischen Gebieten auf. Gute Lichtverhältnisse für das Wachstum von *Schistidium crassipilum* herrschen laut Abb. 2-17 von halbschattig bis sehr hell, eine direkte Besonnung ist häufig. Das Dickhaar-Spalthütchen verhält sich hinsichtlich ihrer Temperaturzahl wie die anderen drei Moose in sonniger Lagerung. Es tritt in collin warmen, sowie auch in montanen Gebieten auf.

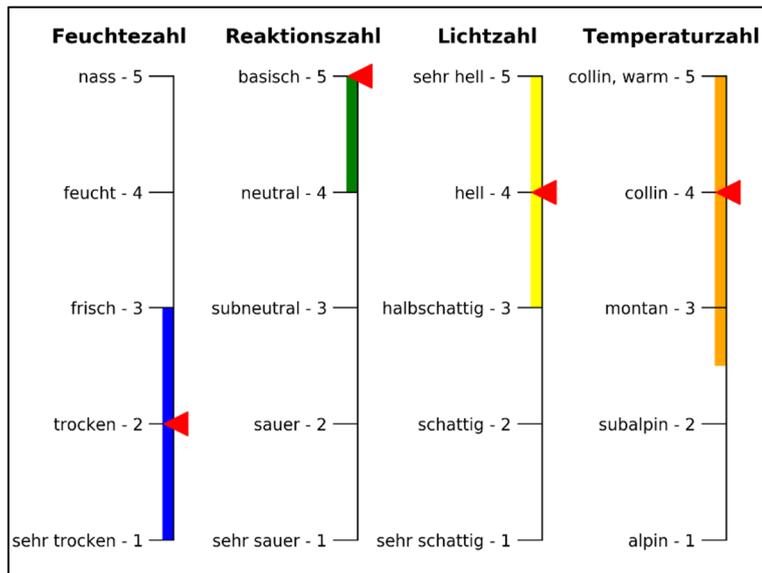


Abb. 2-17: Zeigerwerte *Schistidium crassipilum* (Landolt u. a., 2010, mod.)

2.3.5 *Amblystegium serpens*

Amblystegium serpens (siehe Abb. 2-18), oder auch kriechendes Stumpfdeckelmoos, ist grün bis dunkelgrün und bildet lockere bis dichte Rasen mit einem kriechendem Hauptstamm und stehenden Ästen. Typische Habitate sind kalkhaltige, neutrale und auch schwach saure Gesteine, sowie Mauern und Dächer. Es tritt auch auf Baumrinde und auf Erde zwischen anderen Moosen auf. Das Stumpfdeckelmoos ist im Flachland bis in die Montanstufe verbreitet, in höheren Lagen wird es seltener. Es wächst besonders im menschlichen Siedlungsgebiet, da es gegenüber Umweltchemikalien unempfindlich ist. Bei *Amblystegium serpens* handelt es sich um eine ungefährdete Art. (Meinunger & Schröder, 2007)



Abb. 2-18: *Amblystegium serpens*

Hinsichtlich der Umgebungsfeuchte tritt nach Abb. 2-19 *Amblystegium serpens* mit mittlerer Abweichung in frischem Habitat auf. Das bedeutet sowohl in feucht, bis fast nasser und trockener, bis fast sehr trockener Umgebung. Die Feuchtezahl von 4 aus Abb. 2-20 impliziert, dass das Substrat des kriechenden Stumpfdeckelmooses selten ganz austrocknet, aber auch kaum überschwemmt wird. Die Reaktionszahl aus Abb. 2-19 zeigt, dass das Moos von basischem Bereich bis zum beinahe sauren Bereich wächst. Aus der Abb. 2-20 geht hervor, dass sich der bevorzugte pH-Wert für das Moossubstrat ca. zwischen 5,5 und 6,5 bewegt. Sowohl Abb. 2-19 und Abb. 2-20 klassifizieren das kriechende Stumpfdeckelmoos als Halbschattenpflanze, jedoch ist nach Landolt u. a. (2010) eine mittlere Abweichung von diesem Wert möglich. Die bevorzugte Wachstumstemperatur liegt laut Abb. 2-19 im collin, warmen bis montan, bzw. fast subalpinen Bereich. Abb. 2-20 gibt keine Auskunft zur Temperaturzahl.

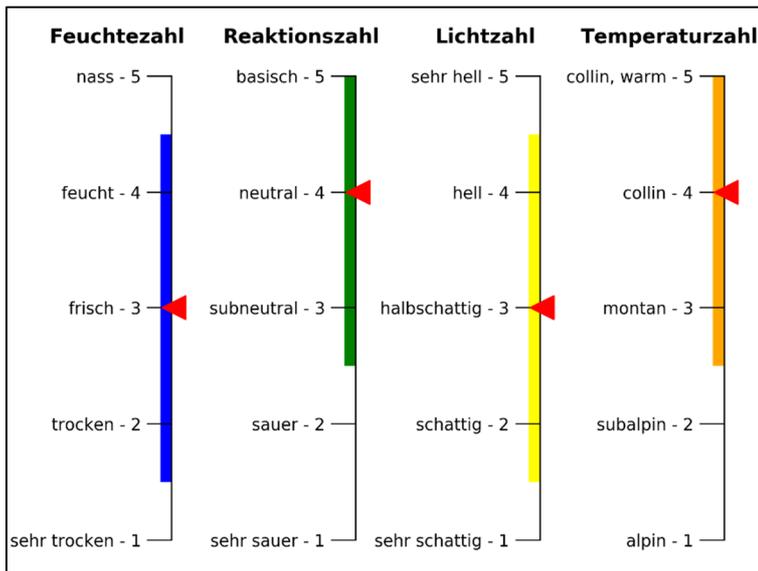


Abb. 2-19: Zeigerwerte *Amblystegium serpens* (Landolt u. a., 2010, mod.)

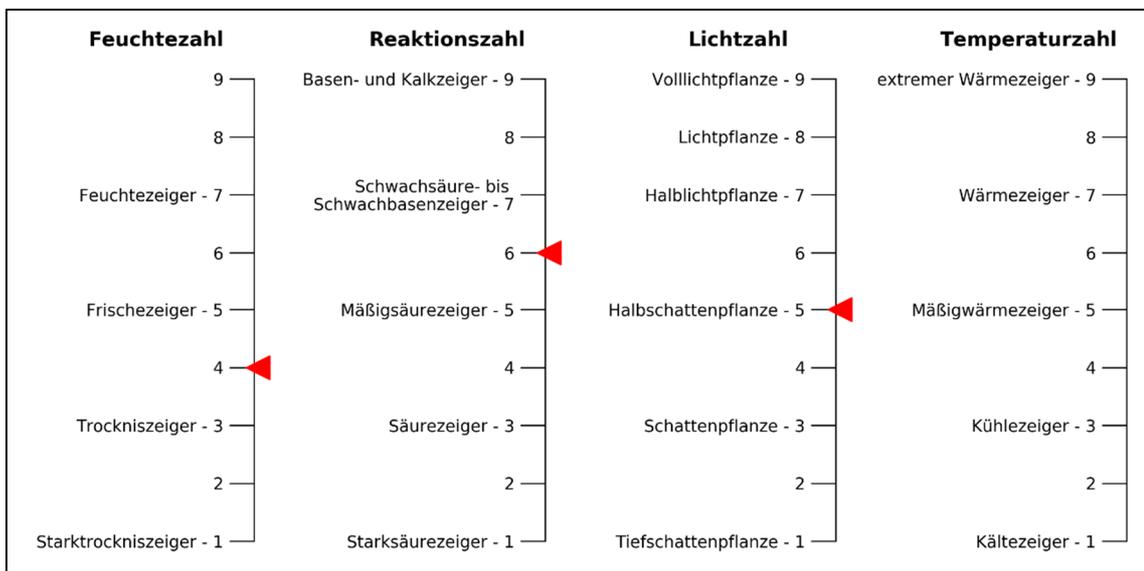


Abb. 2-20: Zeigerwerte *Amblystegium serpens* (Ellenberg u. a., 2001, mod.)

2.3.6 *Hypnum cupressiforme*

Hypnum cupressiforme (siehe Abb. 2-21) hat im deutschen den Namen Zypressen-Schlafmoos. Es bildet meist blassgrüne, gelblich bis rötlich braune Rasen mit verjüngenden Astenden. Es ist eine kalk- und basenliebende Gattung, welche sich auf Gestein und Hummus in kühlen Gebieten findet. Es ist in montanen bis alpine Standorte verbreitet. Das Zypressen-Schlafmoos ist eine ungefährdete Art. (Meinunger & Schröder, 2007)



Abb. 2-21: *Hypnum cupressiforme*

Wie auch *Amblystegium serpens* (siehe 2.3.5) trocknet das Substrat von *Hypnum cupressiforme* nach Abb. 2-23 selten aus und nach Abb. 2-22 wächst es sowohl in feucht, bis fast nasser und trockener, bis fast sehr trockener Umgebung. Hinsichtlich des bevorzugten pH-Werts des Untergrundes definieren die Zeigerwerte aus Abb. 2-22 für Zypressen-Schlafmoos eine Spannweite von ca. 4 bis 7. Abb. 2-23 hingegen spezifiziert den pH-Wert des Substrates als zwischen deutlich unter 5 bis maximal 6. Die Lichtzahl wird nur in Abb. 2-23 als Halbschattenpflanze, also nur selten im vollen Licht auftretend, definiert. Als bevorzugte Temperaturumgebung gibt Abb. 2-22 montan mit mittlerer Abweichung an. Das heißt colline bis fast collin, warme und subalpine bis fast alpine Umgebungen sind möglich. Abb. 2-23 gibt keine Angaben zur Temperaturzahl.

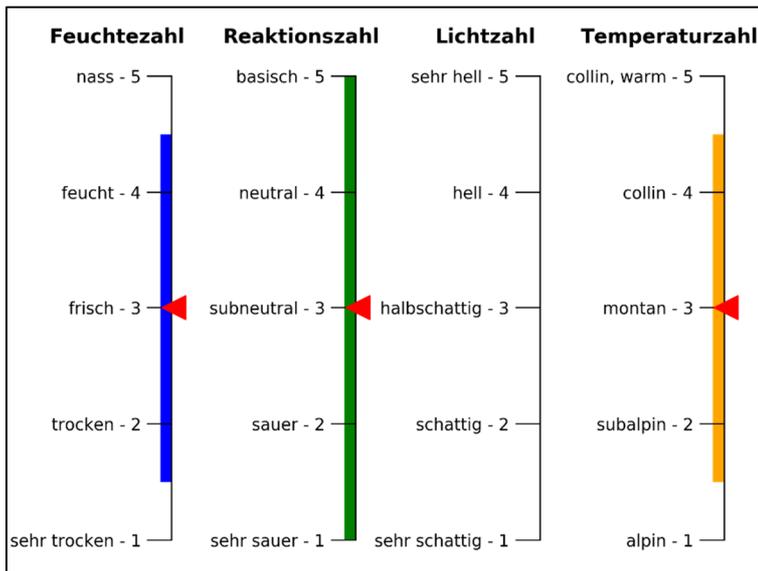


Abb. 2-22: Zeigerwerte *Hypnum cupressiforme* (Landolt u. a., 2010, mod.)

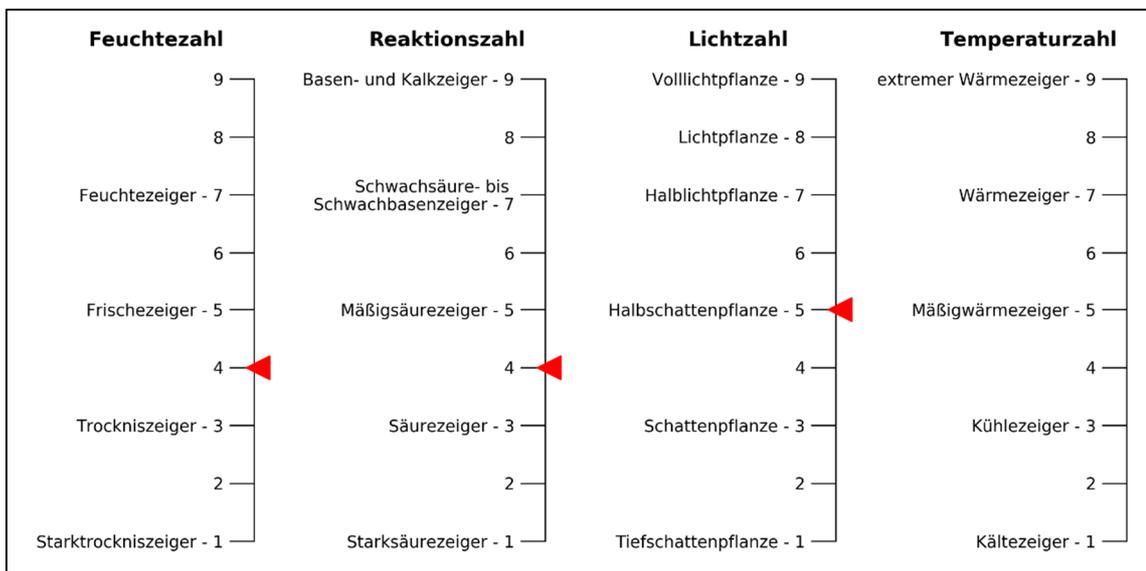


Abb. 2-23: Zeigerwerte *Hypnum cupressiforme* (Ellenberg u. a., 2001, mod.)

2.3.7 *Brachythecium rutabulum*

Brachythecium rutabulum (siehe Abb. 2-24), oder auch Rauhstieliges Kurzbüchsenmoos, bildet grüne bis gelbgrüne Rasen. Es wächst in halbschattiger Umgebung, meist auf feuchten, nährstoffreichen Untergrund. Typische Substrate sind kalkhaltige Erde, Felsen, Totholz, Parkanlagen, Bäche und Sümpfe. Das Rauhstieliges Kurzbüchsenmoos tritt oft in Begleitung anderer Moose wie *Hypnum cupressiforme*, *Brachythecium salebrosum* und *Calliergonella cuspidata* auf. Es kommt im Flachland, sowie in alpinen Standorten vor, wo es bis hin zur Waldgrenze wächst. *Brachythecium rutabulum* ist eine weitverbreitete Art und ungefährdet. (Meinunger & Schröder, 2007)



Abb. 2-24: *Brachythecium rutabulum*

Wie auch *Amblystegium serpens* (siehe 2.3.5) und *Hypnum cupressiforme* (siehe 0) trocknet das Substrat von *Brachythecium rutabulum* nach Abb. 2-26 selten aus und nach Abb. 2-25 wächst es sowohl in feucht, bis fast nasser und trockener, bis fast sehr trockener Umgebung. Hinsichtlich des pH-Werts gibt Abb. 2-25 an, dass das Rauhstieliges Kurzbüchsenmoos für alle pH-Werte der Skala geeignet ist. Abb. 2-26 gibt keine Auskunft zur Reaktionszahl. Laut Abb. 2-25 wächst das Moos sowohl in Umgebung die nie direkte Sonneneinstrahlung erfährt als auch in Umgebung mit stark wechselnden Lichtverhältnissen. Die Definition der Halbschattenpflanze nach Abb. 2-26 impliziert, dass *Brachythecium rutabulum* selten im vollen Licht, aber auch im Schatten wächst. Als bevorzugte Temperaturumgebung gibt Abb. 2-25 montan mit mittlerer Abweichung an. Das heißt colline bis fast collin, warme und subalpine bis fast alpine Umgebungen sind möglich. Abb. 2-26 gibt keine Angaben zur Temperaturzahl.

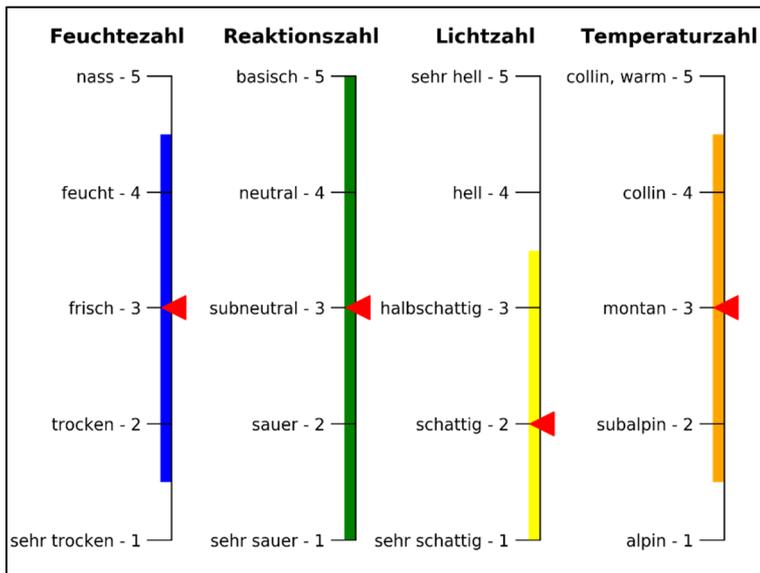


Abb. 2-25: Zeigerwerte *Brachythecium rutabulum* (Landolt u. a., 2010, mod.)

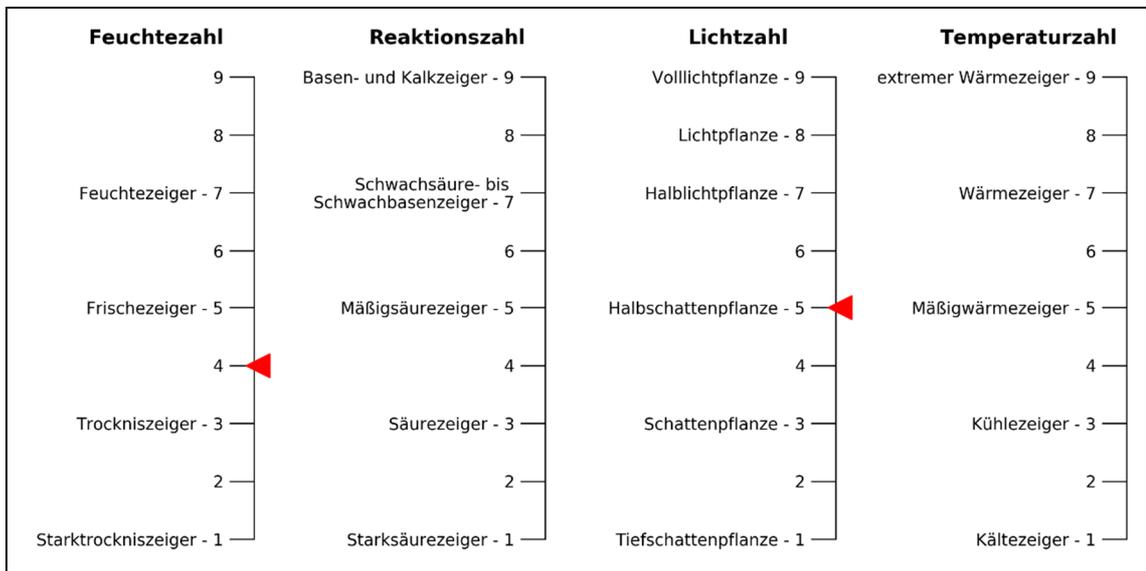


Abb. 2-26: Zeigerwerte *Brachythecium rutabulum* (Ellenberg u. a., 2001, mod.)

2.3.8 Rhynchostegium murale

Rhynchostegium murale (siehe Abb. 2-27), auch Mauer-Schnabeldeckelmoos genannt, wächst in glänzenden, grünen, blassgrünen, bzw. gelbgrünen lockeren bis dichten Rasen. Sein Substrat ist basenreich und kalkhaltig. Das schließt Gestein, Mauern, Beton, aber auch verfestigte Erde und Baumwurzeln ein, aber meist in luftfeuchter Umgebung. Das Mauer-Schnabeldeckelmoos kommt im Flachland, sowie im Alpinraum vor. Rhynchostegium murale ist ungefährdet. (Meinunger & Schröder, 2007)



Abb. 2-27: Rhynchostegium murale

Das Mauer-Schnabeldeckelmoos ist laut Abb. 2-29 ein Frischezeiger. Es tritt auf mittelfeuchten Böden auf und bevorzugt luftfeuchte Lagen. Die Abb. 2-28 definiert es als frisch mit leichter Abweichung, es tritt also bei mittleren Feuchtigkeitsverhältnissen auf. Die Reaktionszahl aus Abb. 2-29 definiert Rhynchostegium murale als auf pH 6 bis pH 6,9 wachsend, aber noch nicht auf neutralen Untergrund. Abb. 2-28 schreibt dem Moos jedoch Wachstum auf Untergründen von subneutral, bis basisch zu, was einen pH-Bereich von 4,5 bis größer 7 einschließt. Hinsichtlich der Lichtzahl gibt Abb. 2-28, wie auch Abb. 2-29 an, dass das Mauer-Schnabeldeckelmoos im halbschattigen Gebieten wächst, also nur selten im vollen Licht. Abb. 2-28 gibt zudem eine mittlere Abweichung an, was bedeutet, dass das Moos sowohl in Bereichen ohne direkte Besonnung wie auch in Bereichen mit häufiger direkter Besonnung vorkommt. Ein Kühlezeiger (siehe Abb. 2-29) wächst vorwiegend in hochmontanen Lagen, bzw. in temperat, borealen Bereichen vor. Als bevorzugte Temperaturumgebung gibt Abb. 2-28 montan mit mittlerer Abweichung an. Das heißt colline bis fast collin, warme und subalpine bis fast alpine Umgebungen sind möglich

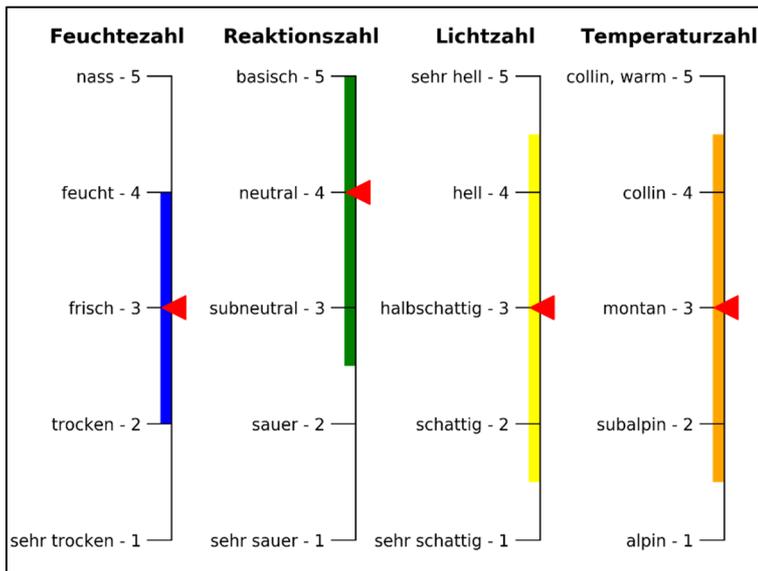


Abb. 2-28: Zeigerwerte *Rhynchosyrium murale* (Landolt u. a., 2010, mod.)

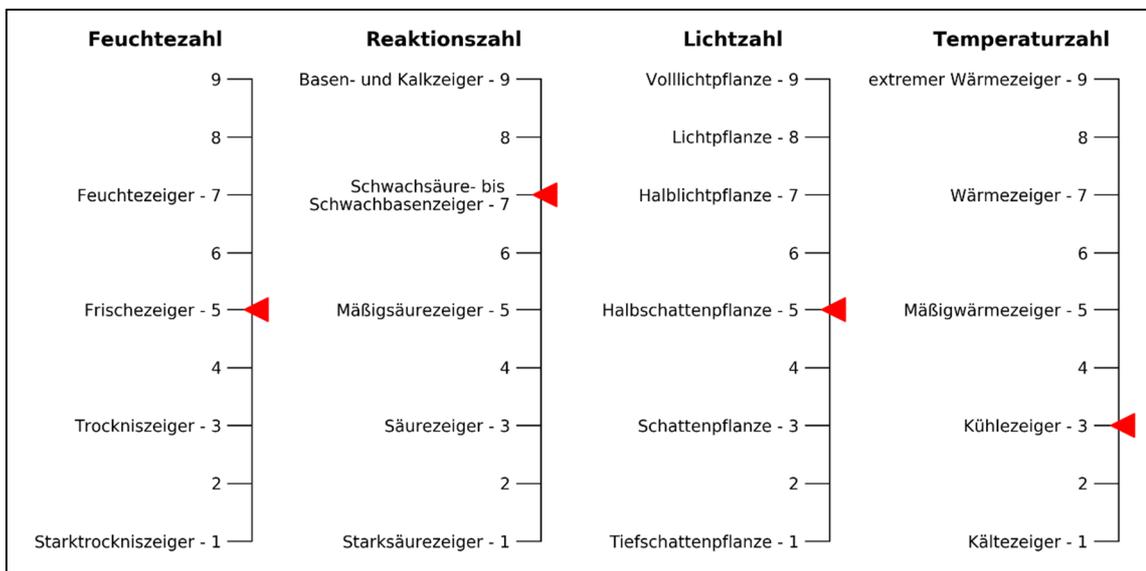


Abb. 2-29: Zeigerwerte *Rhynchosyrium murale* (Ellenberg u. a., 2001, mod.)

3 Beton und Moos - Herstellung und Auslagerung

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt darin eine möglichst realistische Situation des Moosbewuchses im Stadtgebiet zu simulieren und die dadurch gewonnenen Daten auszuwerten. Dieses Kapitel befasst sich mit den im Botanischen Garten der Universität Graz ausgelagerten Probekörpern.

3.1 Ausgewählte Moosarten

Die Auslagerungsversuche fanden an zwei Standorten statt. In schattiger Umgebung, erdnah hinter dem Gebäude des Instituts für Biologie der Universität Graz und in sonniger Umgebung, auf einer neu gebauten Überdachung im Garten des Botanischen Gartens der Universität Graz. Tabelle 3-1 zeigt wie die Moose aus 2.3 den jeweiligen Standorten zugewiesen wurden.

Tabelle 3-1: Zuordnung der Moosarten

Sonnige Lagerung	Schattige Lagerung
<i>Tortula muralis</i>	<i>Amblystegium serpens</i>
<i>Grimmia pulvinata</i>	<i>Hypnum cupressiforme</i>
<i>Orthotrichum anomalum</i>	<i>Brachythecium rutabulum</i>
<i>Schistidium crassipilum</i>	<i>Rhynchostegium murale</i>

3.2 Festlegung der zu untersuchenden Eigenschaften der Betonvarianten

Um für das Mooswachstum relevante Eigenschaften von Beton zu finden wurden die im Folgenden beschriebenen, möglichen Faktoren untersucht.

3.2.1 Rauigkeit

Moos hat gegenüber höheren Pflanzen einen signifikanten Vorteil hinsichtlich des Wachstums auf Beton. Es hat keine Wurzeln, bzw. es verankert sich oberflächlich am Substrat mithilfe von Rhizoiden, also haarförmig gewachsene Zellen. Abb. 3-1 zeigt die Moosart *Fossombronia wondraczekii* und ihre rötlichen Rhizoiden. Die Rauigkeit des Untergrundes ist insofern ein Faktor, da sich diese haarförmigen Rhizoiden auf einer glatten Oberfläche nicht anklammern können. In windiger Umgebung führt eine unzureichende Verankerung des Moooses auf einer glatten Oberfläche dazu, dass es weggeblasen wird. Die Bestimmung der Oberflächenrauigkeit erfolgt im Rahmen dieser Arbeit anhand einer Rautiefenbestimmung (siehe 4.2) und einer optischen 3D Analyse mithilfe eines digitalen Mikroskops (siehe 4.8).



Abb. 3-1: Rhizoiden von *Fossombronina wondraczekii*

3.2.2 Wasseraufnahme

Wie in 2.2.1.1 schon beschrieben, nehmen Moose das benötigte Wasser aus der feuchten Umgebungsluft auf. Daher ist es wichtiger ein luftfeuchtes Habitat zu schaffen, als ein durchfeuchtetes Substrat. Bei einem Regenereignis kann Beton Feuchtigkeit aus dem Boden aufnehmen und durch Verdunstung an die Umgebung abgeben. Die Geschwindigkeit mit der dies erfolgt hängt dabei von den im Beton vorhandenen Porenräumen ab. Im Beton vorhandene Poren werden in Gelporen (0,5-10 nm), Kapillarporen (5-5000 nm), Luftporen (Micrometer bis Millimeterbereich) und Verdichtungsporen (ab Micrometer) unterschieden, umfassen aber auch Poren die in der verwendeten Gesteinskörnung auftreten (Kornporen) und Hohlräume die zwischen der Gesteinskörnung auftreten (Haufwerksporen) (Kumar & Bhattacharjee, 2003). Haupteinfluss auf die wassersaugenden Eigenschaften des Betons hat dabei der Anteil an Kapillarporen, die mit einander verbunden sind und durch ihren geringen Durchmesser Kapillarwirkung erlauben. Die in dieser Arbeit durchgeführten Prüfungen des Betons umfassen kapillare Saugwirkung, die einhergehende Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten und Wasseraufnahme nach 24 h durch kapillares Saugen (siehe 4.3), einer Bestimmung der Dichten, Porenräume und Gesamtwasseraufnahme der Betone (siehe 4.4) und einer Langzeitlagerung der Betonproben bei unterschiedlichen Luftfeuchten um auf ihre Absorptionseigenschaften aus der Luft zu schließen (siehe 4.5).

3.2.3 pH-Wert

Alle der in dieser Arbeit betrachteten Moose wachsen meist auf pH neutralen bzw. leicht basischem Untergrund. Der typische pH-Wert von unkarbonatisierten Beton liegt bei ca. 12,5. Dies ist auf die Alkalität der Porenlösung im Beton zurückzuführen. Dieser basische pH-Wert lässt kein Wachstum von Moosen zu. Durch Anwesenheit von Kohlendioxid (CO_2) in der Umgebung des Betons karbonatisiert dieser. Dabei reagiert CO_2 mit dem Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) zu Calciumcarbonat (CaCO_3) und Wasser (H_2O) (Hunkeler & Hermann, 1999). Dies hat

positiven Einfluss auf die Druckfestigkeit und senkt dabei den pH-Wert des Betonporenwassers auf laut Hunkeler & Hermann (1999) auf unter 9. In Kooperation mit Herrn Dr.rer.nat. BSc MSc Cyrill Grengg vom Institut für Angewandte Geowissenschaften wurden die Betone hinsichtlich ihres pH-Wertverlaufs über den Querschnitt mit Hilfe einer hochauflösenden optischen pH Fotografie analysiert (siehe 4.6). Zwei weitere Versuche beschäftigen sich zudem mit dem Einfluss von Niederschlagswässern auf den Oberflächen-pH-Wert des Betons durch eine mögliche Diffusion des basischen Porenwassers der Probe (siehe 4.7).

3.3 Herstellung des Betons

Es wurden vier verschiedene Arten von Beton für diesen Versuch herangezogen. Der poröse UHPC und der Normalbeton wurden ursprünglich für andere Projekte hergestellt und hier weiterverwendet. Der Drainbeton und der Substratbeton wurden eigens hergestellt und bestehen aus derselben Betonmischung mit dem Unterschied, dass beim Substratbeton zusätzlich Lehm eingepresst wurde. Tabelle 3-2 zeigt eine Übersicht der Betonmischungsverhältnisse.

Tabelle 3-2: Übersicht Betonmischungen

Normalbeton		poröser UHPC		Drain- und Substratbeton	
Menge: 1500 l		Menge: 1,9 l		Menge: 6,2 l	
W/B: 0,47		W/B: 0,22		W/B: 0,35	
Bestandteil	Masse [kg]	Bestandteil	Masse [kg]	Bestandteil	Masse [kg]
Cem II A-M 42,5 N	463,18	Cem I 52.5 N	1,385	CEM I 42,5 R	1,858
AHWZ	88,83	Microsilika	0,18	Wasser	0,6544
Fließmittel	4,14	Wasser	0,349	Quarzsand 3-3,5 mm	13,477
Wasser	170,72	Quarzmehl	0,388		
RK 0/4 GF85 f5 F1	1377,18	Quartzpuder 100 - 200 µm	0,446		
RK 4/16 GC85/20 f1.5 F1	890,92	Quarzsand (0.3 - 0.8) mm	1,25		
RK 16/32 GC85/20 f1.5 F1	560,77	Basalt 1/3	0,551		

Beton wird im Bauwesen unter anderem nach seiner 28 Tage Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit kategorisiert. So weist der in dieser Arbeit verwendete Normalbeton eine Druckfestigkeit von rund $> 50 \text{ N/mm}^2$ und der poröse UHPC gemäß dem Prüfergebnis einer vergleichbaren Mischung eine Druckfestigkeit von rund 130 N/mm^2 auf. Der für diesen Versuch hergestellte Drainbeton wurde nicht auf seine Druckfestigkeit, dafür aber auf Biegezugfestigkeit geprüft, was die übliche maßgebliche, mechanische Belastung von Betonplatten darstellt.

Dabei ist zu beachten, dass das Verhältnis von Wasser zu Bindemittel ($W/B_{\text{ä}}$...äquivalenter Wasser/Bindemittelwert zu W/Z-Faktor in Deutschland) beeinflusst das Hydratationsverhalten des Betons und damit in weiterer Folge die Druckfestigkeit, bzw. die Biegezugfestigkeit des Betons. So führt eine Erhöhung des $W/B_{\text{ä}}$ -Werts, oder W/Z-Werts bei der Herstellung des Betons zu einer Vergrößerung der Porosität, was zu einer Abnahme der Festigkeit führt. (Stehno, 1981)

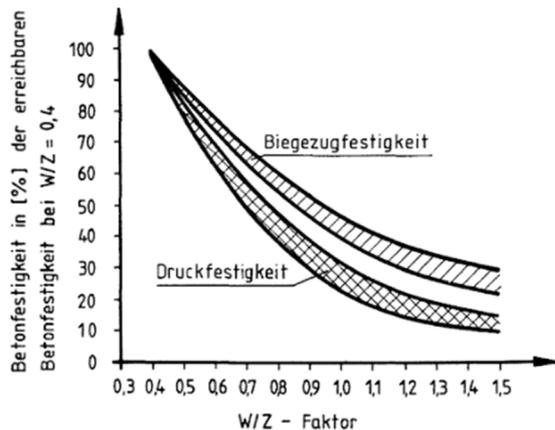


Abb. 3-2: Abnahme der Biegezug- und Druckfestigkeit bei zunehmenden W/Z – Faktor ($W/B_{\text{ä}}$ -Wert) (Stehno, 1981)

3.3.1 Poröser UHPC

Bei dem für die Auslagerung verwendeten UHPC-Platten handelt es sich um speziellen UHPC, der als Kernbeton einer Betonwerksteinplatte gedacht ist und erdfeuchte Konsistenz aufweist. Er wurde am 22.08.2017 für Biegezugmessungen im Hermetik-Verfahren hergestellt. Das Mischungsverhältnis wurde so gewählt, dass zwischen der Gesteinskörnung Hohlräume verbleiben. Der Beton weist daher planmäßig einen hohen Anteil an Haufwerksporen im Micrometerbereich auf. Der Beton hat einen W/B -Wert von 0,223, das heißt dass keine vollständige Hydratation im Zementgefüge stattfand. Im Rahmen der Biegezugmessung wurden die 25*25*3 cm (Höhe*Breite*Tiefe) großen Platten auf halber Höhe durchgebrochen. Daher haben die in diesem Versuch verwendeten Betonplatten Abmessungen von ca. 25*12,5*3 cm.



Abb. 3-3: Poröser UHPC

3.3.2 Normalbeton

Dieser Beton soll den Standardfall des im Bauwesen verwendeten Betons darstellen. Die in diesem Versuch verwendeten Platten wurden ursprünglich am 01.06.2017 für einen Sprühbetonversuch der Firma RetroTec hergestellt. Die exakte Bezeichnung des Lieferbetons lautet C30/37 XC1 F52 GK22 42,5N und der W/B-Wert beträgt 0,47. Die Oberfläche der Normalbetonplatten wurde sandgestrahlt, was zu höherer Oberflächenrauigkeit führt. Der Normalbeton hat Abmessungen von ca. 15x15x3 cm (Höhe*Breite*Tiefe).



Abb. 3-4: Normalbeton

3.3.3 Drainbeton

Die Grundidee, die hinter der Herstellung des in Abb. 3-5 gezeigten Drainbeton stand, ist einen Beton zu schaffen, der nicht nur über hohe Oberflächenrauigkeit, sondern auch gute Wasseraufnahme- bzw. Abgabekapazität besitzt. Dies wird durch das haufwerksporige Gefüge (Durchmesser bis ca. 2,5 mm) des Betons gewährleistet. Auftretendes Wasser wird von dem Beton sofort aufgenommen und kann durch die große Oberfläche, die durch den Haufwerksporenraum entsteht, sehr schnell wieder verdunsten. Dies soll zu einer guten Feuchtigkeitsversorgung des Moores führen.



Abb. 3-5: Drainbeton

Die Herstellung des Betons erfolgte mithilfe einer Betonplattenpresse (siehe Abb. 3-6), in welche das portionierte Mischgut eingefüllt und verpresst wurde. Das Wasser/Bindemittel-Verhältnis beträgt 0,352. Die Platten haben herstellungsbedingt Abmessungen von 25x25x3 cm (Höhe*Breite*Tiefe). Die Platten wurden nach dem Pressvorgang ca. eine Woche bei 65% relativer Luftfeuchte zum Aushärten gelagert.



Abb. 3-6: Betonplattenpresse

3.3.4 Substratbeton

Der hier als Substratbeton bezeichnete Beton ist ein weiter verarbeiteter Drainbeton (siehe 3.3.3). Für die Weiterverarbeitung wurden 6 kg Töpferton mit einem Feinanteil von 0-0,2 mm mit 400 g Wasser angemischt. Diese Tonmischung wurde in die Betonplattenpresse, wie in Abb. 3-7 gezeigt, eingebracht.



Abb. 3-7: Töpfertonmischung in Betonplattenpresse

Die Drainbetonplatte wurde, wie in Abb. 3-8 gezeigt, in die Betonplattenpresse auf die Töpfertonmischung eingebracht. Dann wurde die Platte für 3 Sekunden mit der Tonmischung verpresst.



Abb. 3-8: In Betonplattenpresse eingelegte Drainbetonplatte

Das Resultat ist die in Abb. 3-9 gezeigten Drainbetonplatte mit eingepresstem Töpferton, die in diesem Projekt als Substratbeton bezeichnet wird.



Abb. 3-9: Substratbeton

Abb. 3-10 zeigt eine in der Mitte durchgebrochene Substratbetonplatte. Es ist gut zu erkennen, dass die Tonmischung ca. 0,7-1,0 cm in den Porenraum vorgedrungen ist. Der theoretische Vorteil für Mooswachstum des Substratbeton gegenüber dem Drainbeton ist, dass der Töpferton einerseits einen pH-Wert von 6,8-7,0 aufweist und etwaig austretendes Porenwasser neutralisieren würde. Andererseits sollte der Ton auftretendes Wasser länger halten und langsamer verdunsten als der Drainbeton.



Abb. 3-10: Substratbeton gebrochen

3.4 CO₂ Vorbehandlung der Proben

In der Bautechnik hat der basische pH-Wert des Porenwassers von Beton die Aufgabe den im Beton vorhandenen Stahl vor Korrosion zu schützen. Durch das im Beton entstehende alkalische Milieu bildet sich an der Oberfläche des Bewehrungsstahls eine dünne, aber sehr dichte Schicht aus Eisenhydroxid. Diese dichte Schicht wird der Wasserzutritt zum Eisen verhindert und die Korrosion unterbunden. Fällt der pH-Wert des umgebenden Porenwassers aber unter einen Wert von 9, so verliert der Stahl die schützende Hydroxidschicht und er beginnt zu rosten. Die hohe Alkalität des Porenwassers kann durch die oberflächliche Karbonatisierung verloren gehen. Dabei reagiert das im Beton vorhandene Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) mit dem in der Luft vorhandenen Kohlendioxid (CO₂) zu Calciumcarbonat (CaCO₃) und Wasser (H₂O). Bei dieser Reaktion fällt der pH-Wert des Betons von ca. 12,5 auf unter 9 ab. (Tritthart, 1989)

Die in dieser Arbeit verwendeten Betonplatten wurden ohne Stahleinlagen hergestellt. Daher hat Karbonatisierung keinen negativen Einfluss auf den Werkstoff, sondern erhöht sogar dessen Druckfestigkeit. Die in 2.3 beschriebenen Moose wachsen zwar auf Oberflächen mit basischen Eigenschaften, dennoch ist leicht saures Habitat umso geeigneter. Daher wurden die Betonplatten wie in Tabelle 2-1 beschrieben, oberflächlich mit CO₂ angesäuert, bzw. karbonatisiert.

Für diese Arbeit ist im speziellen der theoretische Beschleunigungsfaktor für gleiche Karbonatisierungstiefen interessant, da mit ihm ein theoretisches Betonalter hinsichtlich der Karbonatisierung berechnet werden kann. Dabei wird die Karbonatisierungstiefe der erhöhten CO₂ Konditionierung mit der natürlichen gleichgesetzt. Daher beschreibt der theoretische Beschleunigungsfaktor um wieviel schneller der Beton bei erhöhtem CO₂-Gehalt die Karbonatisierungstiefe erreicht, als bei natürlichem CO₂-Gehalt.

Der theoretische Beschleunigungsfaktor wird mit Gleichung 3-1 berechnet (Hunkeler, 2012):

$$B_{K,theor} = \sqrt{\frac{[CO_2]_S}{[CO_2]_N}} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

mit:

$B_{K,theor}$... Theoretischer Beschleunigungsfaktor für den Karbonatisierungskoeffizienten,
 $[CO_2]_S$... erhöhter CO₂-Gehalt (%), $[CO_2]_N$... natürlicher CO₂-Gehalt (%)

Unter Berücksichtigung eines natürlichen CO₂-Gehalts von 0,04 % ergibt sich für einen erhöhten CO₂-Gehalt von 2,00 % ein theoretischer Beschleunigungsfaktor von 7,07 und für einen CO₂-Gehalt von 10,00 % ein theoretischer Beschleunigungsfaktor von 15,81. Wie in Hunkeler (2012) beschrieben wird, weichen diese

Werte jedoch stark von der wirklichen Beschleunigung ab, daher wurden die Faktoren zur Berechnung des theoretischen Betonalters zusätzlich mit einem Faktor von 0,6 multipliziert.

Die im Anhang C dargestellte Karbonatisierungsliste zeigt, wie lange die Betonplatten konditioniert wurden. Dabei wurde nach dem Vorbild von Leemann & Moro (2017) für die Konditionierung bei 2,00 % CO₂ eine relative Luftfeuchte von 65 % und bei 10,00 % CO₂ eine relative Luftfeuchte von 57 % gewählt. Beide Konditionierungen fanden bei 20°C statt. Tabelle 3-3 zeigt eine Auflistung der Konditionierungen der Betone, deren reales Alter am Auslagerungsdatum, sowie auch das berechnete Betonalter entsprechend ihrer Karbonatisierung. In dieser Arbeit werden die nicht speziell konditionierten Betone als unkarbonatisiert bezeichnet. Da diese aber trotzdem natürlicher Karbonatisierung ausgesetzt sind, wird dieser Begriff unter Anführungszeichen gesetzt.

Da Einflussfaktoren wie der W/B-Wert, die Zementart und deren Gehalt, Zusatzstoffe, die Alkalität, die Betonfeuchtigkeit und der Hydratationsgrad des Betons alle die Karbonatisierungsgeschwindigkeit beeinflussen, kann das theoretische Betonalter nur als grober Richtwert genommen werden (Hunkeler, 2012). Das theoretische Betonalter in Bezug auf die Karbonatisierung zum Auslagerungsdatum ergibt sich somit wie folgt:

Tabelle 3-3: Konditionierung Betonplatten

Betonbezeichnung	Herstellungsdatum	Auslagerungsdatum	Reales Betonalter [Tage]	Betonalter entsprechend der Karbonatisierung [Tage]	Anmerkungen
Poröser UHPC	22.08.2017	03.05.2018	254	309	
Normalbeton	01.06.2017		336	336	Unkonditioniert
Normalbeton	03.05.2018		0	0	Wurde am Auslagerungstag frisch gebrochen und hat daher eine nicht karbonatisierte Oberfläche.
Normalbeton	01.06.2018	05.06.2018	369	711	
Drainbeton	23.04.2018	03.05.2018	10	10	Unkonditioniert
Drainbeton	26.04.2018	05.06.2018	40	344	
Substratbeton	26.04.2018	05.06.2018	40	230	Weniger Karbonatisierung notwendig, da der eingepresste Ton pH neutral, bzw. sauer ist.

3.5 Auslagerung der Proben

Um eine Verwehung, bzw. witterungsbedingte Störung des Versuchs zu vermeiden, wurden die in Tabelle 3-1 angeführten Moose mit einer Agar-Agar Lösung auf dem Beton festgeklebt. Agar-Agar ist ein Kohlenhydrat aus den Zellwänden der Blau- oder Rotalge und wird beim Kochen oft als pflanzlicher Geleersatz verwendet. Für die Auslagerung wurde es mit Wasser in einem Verhältnis von 1 zu 1000 aufgekocht und dünn auf den Beton aufgetragen. Wie Abb. 3-11 zeigt, wurde in die Agar-Agar Lösung das Moos eingedrückt. Das Agar-Agar wird in wenigen Tagen auf natürliche Weise abgebaut und das Moos bleibt am Beton zurück. Während diese Zeit kann sich das Moos mit Rhizoiden am Beton festklammern.



Abb. 3-11: Beton mit Agar-Agar und Moos

Da die Konditionierung von Normal-, Drain- und Substratbeton längere Zeit in Anspruch nahm, wurde die Auslagerung auf zwei Termine verteilt.

3.5.1 Auslagerung am 03.05.2018

An diesem Termin wurden die „unkarbonatisierten“ Normalbetonplatten, die „unkarbonatisierten“ Drainbetonplatten und die porösen UHPC-Platten ausgelagert. „Unkarbonatisiert“ steht hier für natürliche Karbonatisierung, also Karbonatisierung infolge von Kontakt mit Umgebungsluft. Für die schattige Lagerung wurde der Untergrund (Erde) nach Möglichkeit horizontalisiert und die Platten darauf aufgelegt. Tabelle 3-4 zeigt eine Auflistung der Anzahl der an diesem Termin ausgelagerten Betonplatten.

Tabelle 3-4: Probenaufstellung Auslagerung 03.05.2018

Betonvariation	Anzahl der ausgelagerten Platten	
	Schattige Lagerung	Sonnige Lagerung
poröser UHPC	3	3
Normalbeton „unkarbonatisiert“	4	4
Normalbeton frisch gebrochen	2	2
Drainbeton „unkarbonatisiert“	4	4

Wie Abb. 3-12 zeigt, wurden die Betonplatten mit Pflanzenschildern beschriftet.



Abb. 3-12: Schattige Auslagerung

Wie in Abb. 3-13 zu erkennen ist, wurden für die sonnige Auslagerung (Platten mit dem Index „SO“) die Betonplatten ca. 2 cm in den Untergrund (Dachschotter) eingegraben. Die Beschriftung erfolgte wie bei der schattigen Lagerung mit Pflanzenschildern.



Abb. 3-13: Sonnige Auslagerung

3.5.2 Auslagerung am 05.06.2018

Am 05.06.2018 wurden die verbleibenden Platten, also der karbonatisierte Normalbeton, der karbonatisierte Drainbeton und der Substratbeton ausgelagert. Diese wurden wie in 3.5.1 beschrieben mit Moos bepflanzt. Die Abb. 3-14 zeigt die Auslagerung im schattigen Habitat vom 05.06.2018 im Vordergrund und vom 03.05.2018 im Hintergrund. Tabelle 3-5 zeigt eine Auflistung der Anzahl der an diesem Termin ausgelagerten Betonplatten.

Tabelle 3-5: Probenauflistung Auslagerung 05.06.2018

Betonvariation	Anzahl der ausgelagerten Platten	
	Schattige Lagerung	Sonnige Lagerung
Normalbeton karbonatisiert	4	4
Drainbeton karbonatisiert	4	4
Substratbeton	4	4



Abb. 3-14: Schattige Auslagerung

Abb. 3-15 zeigt die Auslagerung im sonnigen Habitat vom 05.06.2018 rechts im Bild (2 Reihen) und vom 03.05.2018 links im Bild (2 Reihen).



Abb. 3-15: Sonnige Auslagerung

Beim Anmischen der Agar-Agar Lösung ist bei dieser Auslagerung ein Fehler unterlaufen. Dem aufgekochten Wasser wurde ein zu hoher Anteil an Agar-Agar beigegeben. Die Agar-Agar Mischung war bei dieser Auslagerung nicht flüssig, sondern leicht geleeartig (siehe Abb. 3-16). Diese Geleemasse baute sich nicht wie geplant innerhalb weniger Tage ab, sondern bildete nach Verdunstung des Wassers eine dünne Haut, die das Moos festhielt und es vom Anklammern am Beton abhielt.



Abb. 3-16: Agar-Agar Überschuss auf Normalbeton

Abb. 3-17 zeigt dieselbe Normalbetonplatte wie Abb. 3-16 nach 49 Tagen. Es ist gut zu erkennen, dass die Agar-Agar Geleemasse nicht abgebaut, sondern in eine feste, nicht an den Beton gebundene Schicht umgewandelt wurde.



Abb. 3-17: Normalbeton nach 49 Tagen

Dies trifft nicht auf alle an diesem Tag verlegten Platten zu, so zeigt Abb. 3-18 einen Drainbeton vom selben Auslagerungsdatum nach 49 Tagen, auf welchem keine Spuren von Agar-Agar zu erkennen sind.



Abb. 3-18: Drainbeton nach 49 Tagen

4 Messungen und Untersuchungsmethoden

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Grundlagen und Durchführung der Messungen am Beton und der Messung des Mooswachstums auf den Betonplatten der Auslagerung.

4.1 Biegezugfestigkeit

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit erfolgte auf Basis der ÖNorm EN 1339:2007-01-01 Anforderungen und Prüfverfahren für Platten aus Beton. Sie ist das Maß der aufnehmbaren Zugspannung infolge einer Biegebelastung der Platte. Die Biegezugfestigkeit wird in dieser Arbeit zum Vergleich der mechanischen Belastbarkeit der verschiedenen Betone verwendet.

Die Messung wurde mit einer Prüfmaschine (Shimadzu AG-50 kNG) für eine 3-Punkt-Biegebeanspruchung vorbereitet, in welche die Proben eingelegt wurden. Abb. 4-1 zeigt den Aufbau der Biegezugmessung. Dabei müssen die Lastschneide und Auflager mindestens dieselbe Breite wie die zu prüfende Platte aufweisen. Außerdem müssen die Auflager denselben Abstand zur Lastschneide einhalten. (ÖNorm EN 1339: 2007-01-01)

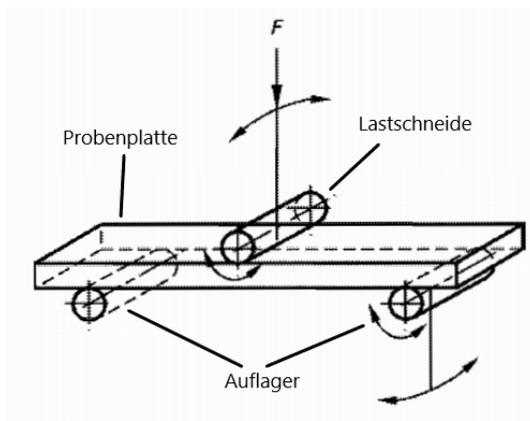


Abb. 4-1: Prinzip der Biegezugprüfung (ÖNorm EN 1339:2007-01-01, mod.)

Die Platten wurden vor der Biegezugprüfung bei 20°C, 65 % relativer Luftfeuchte und CO₂-Gehalt von Umgebungsluft (ca. 0,04 %) gelagert. Drei poröse UHPC-Platten mit Abmessungen von 25*25*3 cm (Höhe*Breite*Tiefe) wurden bereits am 30.08.2017 im Rahmen einer Hermetikplattenprüfung geprüft. Drei Drainbetonplatten mit Abmessungen von 25*25*3 cm (Höhe*Breite*Tiefe) und aufgrund der geringen Plattenanzahl nur eine Normalbetonplatte mit Abmessungen von 15x15x3 cm (Höhe*Breite*Tiefe), wurden am 24.05.2018 geprüft. Zur Lasteinleitung in die Prüfplatten wurden keine Lasteinleitungstreifen verwendet. Die aus der ÖNorm EN 1339:2007-01-01 entnommene Gleichung 4-1 zeigt die für die Berechnung der Biegezugfestigkeit benötigten Parameter. Der Auflagerabstand bei den porösen UHPC- und Drainbetonplatten betrug 200 mm und bei der Normalbetonplatte, wegen dessen kleinen Plattenabmessung, 100 mm. Die Breite

und Höhe der Platte an der Bruchfläche wurden in vierfacher Ausführung gemessen. Die Lasteinleitung erfolgte gleichmäßig und die Bruchlast wurde in weniger als 45 Sekunden erreicht. Mit Gleichung 4-1 wurde die Biegezugfestigkeit der Platten bestimmt.

$$T = \frac{3 * P * L}{2 * b * t^2} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

mit:

T ... Biegezugfestigkeit (MPa), P ... Bruchlast (N), L ... Abstand zwischen den Auflagern (m³/s), b ... Breite der Platte an der Bruchfläche (mm), t ... Höhe der Platte an der Bruchfläche (mm)

4.2 Sandflächenverfahren

Das Sandflächenverfahren ist eine Methode zur Bestimmung der Rautiefe. Die Rautiefe ist der Mittelwert der Distanz zwischen Hoch- und Tiefpunkte der betrachteten Oberfläche.

Die Bestimmung der Rautiefe wurde anhand der zusätzlichen technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) Teil 1 allgemeines Abschnitt 3 Prüfungen während der Ausführung durchgeführt. Diese Richtlinie bezeichnet das Messverfahren als Sandflächenverfahren. Laut Definition ist das Verfahren nur auf horizontalen Betonoberflächen anzuwenden. Die für das Sandflächenverfahren benötigten Hilfsmittel sind (ZTV-ING: 2018-01):

- Ein Gefäß mit bekanntem Hohlraumgehalt (siehe Abb. 4-2)
- Trockener Quarzsand mit einer Körnung von 0,1 bis 0,5 mm (siehe Abb. 4-2)
- Eine runde Hartholzscheibe (siehe Abb. 4-2)
- ein Zollstock



Abb. 4-2: Hilfsmittel Sandflächenverfahren

Beim Sandflächenverfahren wird eine bestimmte Menge Sand gleichmäßig, kreisförmig auf dem zu prüfenden Untergrund verteilt, sodass die Oberflächenvertiefungen gleichmäßig gefüllt sind. Die Rautiefe ist die Höhe des Zylinders, mit dem Kreisdurchmesser des verteilten Sandes und errechnet sich durch Rücksubstitution des bekannten Sandvolumens. (ZTV-ING: 2018-01)

Die Prüfplatten mit den Abmessungen wie in 3.3 beschrieben, wurden vor der Rautiefenmessung am 23.06.2018 bei 20°C, 65 % relativer Luftfeuchte und CO₂-Gehalt von Umgebungsluft (ca. 0,04 %) gelagert. Abb. 4-3 und Abb. 4-4 zeigen das bereits durchgeführte Sandflächenverfahren.

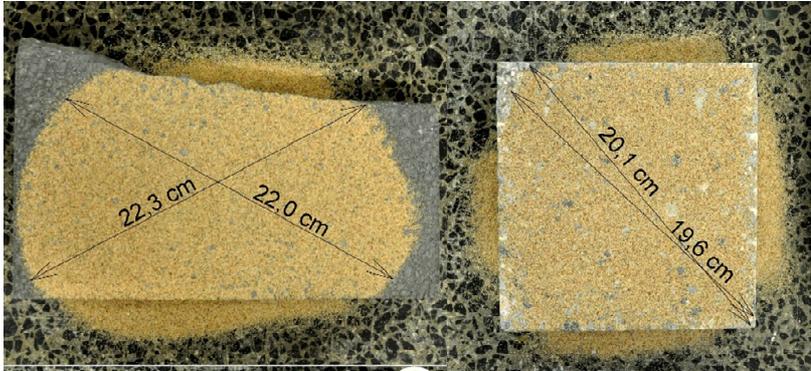


Abb. 4-3: Rautiefenbestimmung von porösen UHPC (links) und Normalbeton (rechts)

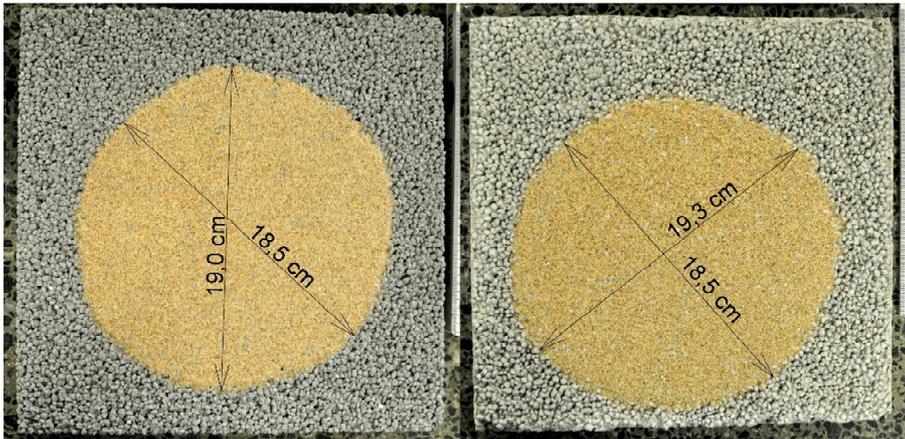


Abb. 4-4: Rautiefenbestimmung von Drain- (links) und Substratbeton (rechts)

Die Berechnung der Rautiefe erfolgte mit Gleichung 4-2 aus ZTV-ING: 2018-01. Für sie wurden die gemessenen Sanddurchmesser und die jeweiligen Messsandvolumen benötigt.

$$R = \frac{40 * V}{\pi * d^2}$$

Gleichung 4-2

mit:

R ... Rautiefe (mm), V ... verwendetes Sandvolumen (cm³), d ... gemessener Sanddurchmesser (cm)

4.3 Kapillare Wasseraufnahme

Der Koeffizient der kapillaren Wasseraufnahme ist ein Maß für die Menge an Wasser (Gramm) pro Flächeneinheit (Quadratmeter) und Zeiteinheit (Sekunde), die von einem Baustoff durch Oberflächenkontakt und in weiterer Folge durch die Kapillarwirkung in dem Porenraum aufgenommen werden kann. Grundlage der Berechnung ist die ÖNorm EN 722-11: 2011-06-15.

Die Probenanzahl pro Betonvariation (siehe 3.3) muss mindestens 6 betragen. Da die Proben nach ÖNorm EN 771-4: 2005-06-01 zugeschnitten wurden und Abmessungen von ca. 50*50*30 mm (Hohe*Breite*Tiefe) haben, war es möglich Schnittbedingt 7 Proben pro Betonvariation für diese Prüfung herzustellen. Vor der Prüfung müssen die Proben in einem belüfteten Wärmeschrank bei 70°C bis zur Massekonstanz getrocknet werden. Die Massekonstanz ist erreicht, wenn innerhalb von zwei 24-Stunden-Messungen der Masseverlust weniger als 0,1 % beträgt. (ÖNorm EN 722-11: 2011-06-15)

Die geschnittenen Betonproben vom porösen UHPC, Normalbeton, Drainbeton und Substratbeton wurden in einem Memmert Universalschrank UF55 bis zur Massekonstanz getrocknet (siehe Anhang F). Danach wurden sie zum Abkühlen auf Raumtemperatur in einem Exsikkator gelagert. Die abgekühlten Proben wurden dann mit einem Messschieber vermessen, mit einer Mettler Toledo PG5002 Präzisionswaage die Masse auf 0,01 g genau bestimmt und in einen mit Wasser gefüllten Behälter auf eine Auflagervorrichtung aufgelegt. Der Versuchsaufbau für den porösen UHPC-Beton ist in Abb. 4-5 dargestellt. Der Behälter, in dem die Probekörper 5 mm tief eingetaucht werden, hat eine Mindestwassertiefe von 20 mm (ÖNorm EN 722-11: 2011-06-15). Der Wasserstand wurde durch konstanten Wasserzu- (siehe Abb. 4-5 rechts in Bild) und Abfluss gewährleistet.



Abb. 4-5: Wasserlagerung kapillare Wasseraufnahme poröser UHPC

Die Probekörper wurden in bestimmten zeitabständen aus dem Behälter entnommen, das Wasser oberflächlich entfernt und mit der Präzisionswaage gemessen (ÖNorm EN 722-11: 2011-06-15).

Der Wasseraufnahmekoeffizient von Porenbetonsteinen laut ÖNorm EN 722-11: 2011-06-15 wird nach Gleichung 4-3 berechnet:

$$c_{w,s} = \frac{m_{s0,s} - m_{dry,s}}{A_s * \sqrt{t_{s0}}} * 10^6 \quad \text{Gleichung 4-3}$$

mit:

$c_{w,s}$... Wasseraufnahmekoeffizient infolge Kapillarwirkung ($g/m^2*s^{0,5}$), $m_{s0,s}$... Masse des Probekörpers nach Eintauchen über eine Zeitspanne t (g), $m_{dry,s}$... Masse des getrockneten Probekörpers (g), A_s ... Gesamtfläche der in das Wasser getauchten Seite des Probekörpers (mm^2), t_{s0} ... Tauchzeit (s)

Die Wasseraufnahme nach 24 Stunden infolge Kapillarwirkung kann mit Gleichung 4-4 berechnet werden:

$$W_{24} = \frac{m_{24} - m_{dry,s}}{m_{dry,s}} * 100 \quad \text{Gleichung 4-4}$$

mit:

W_{24} ... Wasseraufnahme nach 24 h infolge Kapillarwirkung (%), m_{24} ... Masse des Probekörpers nach Eintauchen nach 24 h (g), $m_{dry,s}$... Masse des getrockneten Probekörpers (g)

4.4 Rohdichte, Reindichte, gesamte Wasseraufnahme offene Porosität und Gesamtporosität

Die Rohdichte ist das Verhältnis zwischen Masse und Volumen (einschließlich aller Hohlräume) der trockenen Probe. Die Reindichte hingegen ist das Verhältnis zwischen Masse und Volumen der festen Bestandteile der trockenen Probe. Die offene Porosität beschreibt das prozentuale Verhältnis des Volumens der offenen Poren und dem Volumen (einschließlich aller Hohlräume) der Probe. Die Gesamtporosität ist der prozentuale Anteil des Porenvolumens, was offene und geschlossene Poren einschließt, vom Volumen der Probe einschließlich aller Hohlräume. (ÖNorm EN 1936: 2007-02-01)

In ÖNorm EN 1936: 2007-02-01 wird eine Mindestprobenanzahl von 6 gefordert. Wie auch schon in 4.3 beschrieben, war es herstellungsbedingt möglich 7 Proben herzustellen und zu prüfen. Die Probekörper mit Abmessungen von 5*5*3 cm (Höhe*Breite*Tiefe) weisen ein Gesamtvolumen von 75 ml auf und erfüllen somit die Anforderung laut Norm von mindestens 60 ml. Vor der Prüfung müssen die Proben in einem belüfteten Wärmeschrank bei 70°C bis zur Massekonstanz getrocknet werden. Die Massekonstanz ist erreicht, wenn innerhalb von zwei 24-Stunden-Messungen der Masseverlust weniger als 0,1 % beträgt. Dies wurde mit einem Memmert Universalschrank UF55 durchgeführt. (ÖNorm EN 1936: 2007-02-01)

Die wie zuvor beschriebenen getrockneten Proben wurden zum Abkühlen auf Raumtemperatur in einem Exsikkator gelagert. Danach wurden sie mit einer Mettler Toledo PG5002 Präzisionswaage auf 0,01 g genau gewogen und in einem Exsikkator einem Druck von ca. 2 kPa ausgesetzt (siehe Abb. 4-6). Dieser Druck wurde zwei Stunden lang gehalten, um die Luft aus den offenen Poren zu saugen (ÖNorm EN 1339: 2007-01-01).



Abb. 4-6: Exsikkator mit porösen UHPC-Proben

Der Behälter wurde dann so langsam mit entmineralisiertem Wasser gefüllt, dass ein Druck von zumindest 4 kPa erhalten blieb. Der Druck wurde insgesamt 20 Minuten gehalten (siehe Abb. 4-7).



Abb. 4-7: Exsikkator mit porösen UHPC-Proben und entmineralisiertem Wasser

Dann wurde Atmosphärendruck im Exsikkator hergestellt. Die Probekörper lagerten weitere 24 Stunden wasserbedeckt im Exsikkator. Danach wurden die Probekörper einmal unter Wasser und einmal nach kurzem Abtrocknen über Wasser gewogen. Mit den daraus gewonnenen Werten und der bekannten Dichte des verwendeten Wassers kann mit Gleichung 4-5 die Rohdichte berechnet werden (ÖNorm EN 1339: 2007-01-01):

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \rho_{rh} \quad \text{Gleichung 4-5}$$

mit:

ρ_b ... Rohdichte des Probekörpers (kg/m^3), m_d ... Trockenmasse des Probekörpers (g), m_s ... Masse der gesättigten Probe (g), m_h ... Masse des in Wasser eingetauchten Probekörpers (g), ρ_{rh} ... Dichte des Wassers (kg/m^3)

Die offene Porosität umfasst jeglichen verbundenen Porenraum, der mit dem entionisierten Wasser erreicht werden kann. Im Beton umfasst sie daher alle untereinander direkt verbundenen Poren (z.B. die Haufwerksporen des Drainbetons), sowie alle durch Kapillarporen verbundene Porenräume. Sie kann mit Gleichung 4-6 berechnet werden (ÖNorm EN 1339: 2007-01-01):

$$\rho_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} * 100 \quad \text{Gleichung 4-6}$$

mit:

ρ_o ... offene Porosität des Probekörpers (%), m_d ... Trockenmasse des Probekörpers (g), m_s ... Masse der gesättigten Probe (g), m_h ... Masse des in Wasser eingetauchten Probekörpers (g)

Ist die Masse der gesättigten Probe und die Trockenmasse bekannt kann mit Gleichung 4-7 die Gesamtwasseraufnahme der gesättigten Probe bestimmt werden:

$$W_s = \frac{m_s - m_d}{m_d} * 100 \quad \text{Gleichung 4-7}$$

mit:

W_s ... Gesamtwasseraufnahme der gesättigten Probe (%), m_d ... Trockenmasse des Probekörpers (g), m_s ... Masse der gesättigten Probe (g)

Zur Bestimmung der Reindichte und der Gesamtporosität wurde in dieser Arbeit das Pyknometer-Verfahren gewählt. Dafür wurden drei Proben pro Beton (siehe 3.3) mit einer Retsch Scheibenschwingmühle RS 1 verkleinert und durch ein Sieb mit 0,063 mm Maschenweite gesiebt. Das Mahlgut wurde dann auf Massekonstanz getrocknet und in einem Pyknometer auf einer Mettler Toledo Analysenwaage Excellence XS204 mit einer Toleranz von $\pm 0,01$ g auf 10 g eingewogen und gemeinsam mit dem Pyknometer und dessen Stopfen gemessen. Die Pyknometer wurden dann ca. zur Hälfte mit entionisiertem Wasser gefüllt und in einem Exsikkator zu einem Vakuum von ca. 2 kPa evakuiert (siehe Abb. 4-8).

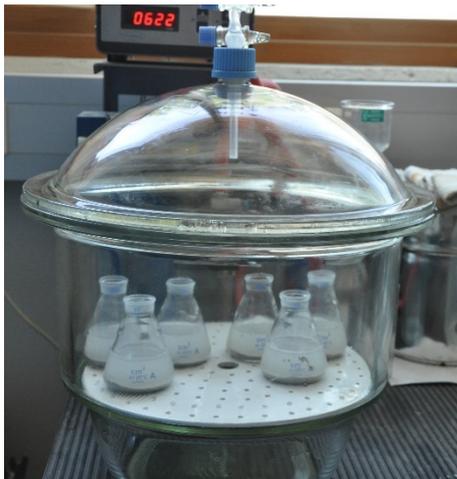


Abb. 4-8: Pyknometer im Exsikkator unter Vakuum

Sobald keine Luftblasen mehr aufstiegen, wurde Atmosphärendruck hergestellt. Dann wurden die Pyknometer mit entionisiertem Wasser aufgefüllt, mit dem Stopfen verschlossen und auf 0,01 g genau gewogen. Mit den daraus gewonnenen Werten und dem bekannten Volumen der Pyknometer kann mit Gleichung 4-8 die Reindichte berechnet werden:

$$\rho_r = \frac{m_1 - m_0}{V_P - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{rh}}} \quad \text{Gleichung 4-8}$$

mit:

ρ_r ... Reindichte des Probekörpers (kg/m^3), m_0 ... Masse des Pyknometers mit Stopfen (g), m_1 ... Masse des Pyknometers mit Stopfen und Probe (g), m_2 ... Masse des Pyknometers mit Stopfen, Probe und entionisiertem Wasser (g), V_P ... Volumen Pyknometer (ml), ρ_{rh} ... Dichte des Wassers (kg/m^3)

Im Vergleich zur offenen Porosität schließt die Gesamtporosität nicht nur den untereinander verbundenen Porenraum, sondern auch unzugängliche Poren mit ein (z.B. Luftporen im Normalbeton, an denen keine Kapillarporen angrenzen). Sie kann mit Gleichung 4-9 berechnet werden (ÖNorm EN 1339: 2007-01-01):

$$\rho = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r}\right) * 100 \quad \text{Gleichung 4-9}$$

mit:

ρ ... Gesamtporosität des Probekörpers (%), ρ_b ... Rohdichte des Probekörpers (kg/m^3), ρ_r ... Reindichte des Probekörpers (kg/m^3)

4.5 Absorptionsisotherme

Hygroskopische Baustoffe, die an Umgebungsluft angrenzen, nehmen entweder Feuchtigkeit aus der Luft auf (Sorptions), oder geben Feuchtigkeit an diese ab (Desorption), bis sich eine Ausgleichsfeuchte im Werkstoff einstellt. Eine Sorptionsisotherme beschreibt das Luftfeuchteaufnahmevermögen eines Baustoffes. (Leschnik, 1999)

Diese Ausgleichsfeuchte hängt von den Umgebungstemperatur, dem W/B-Wert des Betons und der Bauteildicke ab (Linder, 1998). Die Sorptionsisothermen zeigen außerdem Hysterese (Leschnik, 1999). Eine Faustregel nach Hermann (2000) besagt, dass eine 1 cm dicke Betonschicht ca. 100 Tage benötigt, um die Ausgleichsfeuchte (Umgebungsfeuchte von < 100 % relative Feuchte) zu erreichen. Bei einer 2 cm dicken Betonschicht steigert sich dieser Wert bereits auf ca. 400 Tage. Abb. 4-9 zeigt beispielhaft eine typische Sorptionsisotherme von Beton.

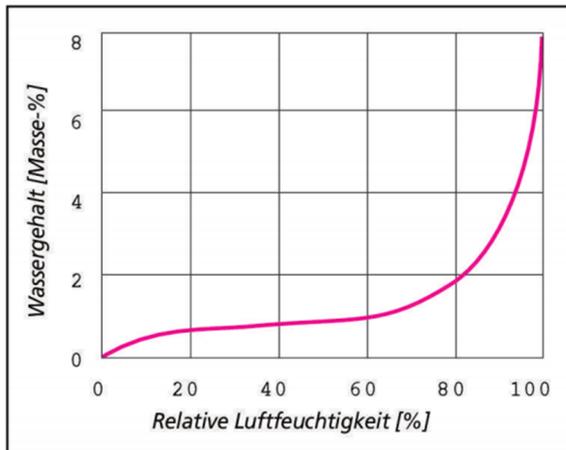


Abb. 4-9: Typische Sorptionsisotherme von Beton (Hermann, 2000)

Es wurden für jeden Beton (siehe 3.3) Proben zur Lagerung bei 75 %, 65 %, 50 %, 28 % und 9 % relativer Luftfeuchte hergestellt. Die Temperatur betrug bei jeder Lagerung 23°C. Die Proben der 75 % r.Lf. Lagerung wurden 61 Tage in einem WTC Binder Klimaschrank KBF 240 und die der 65 % r.Lf. Lagerung für 60 Tage in einem Memmert Klimaschrank ICH260 gelagert. Die Proben der 50 % r.Lf. Lagerung wurden für 102 Tage in einem Klimaraum des Instituts für Materialprüfung und Baustofftechnologie gelagert. Für die Probenlagerung bei 28 % r.Lf. wurde destilliertem Wasser so lange Calciumchlorid beigelegt, bis dieses gesättigt war (das Salz konnte nicht weiter in der Flüssigkeit gelöst werden). Die Lösung wurde mit den Proben in ein luftdichtes Gefäß gestellt und die relative Luftfeuchtigkeit mit einem Messgerät der Firma Smartnote gemessen. Dabei stellte sich der Wert von ca. 28 % ein. Dieser Lagerungszustand wurde 100 Tage aufrechterhalten. Für die Lagerung bei 9 % wurde getrocknetes Silikagel mit den Proben in ein luftdichtes Gefäß gegeben und mit einem Messgerät der Firma Smartnote die relative Luftfeuchte bestimmt. (Stefan, 1889)

Nach der Lagerung bei bestimmter relativer Luftfeuchte wurden die Proben in einem Memmert Universalschrank UF55 bis zur Massekonstanz getrocknet. Die Massekonstanz ist erreicht, wenn innerhalb von zwei 24-Stunden-Messungen der Masseverlust weniger als 0,1 % beträgt.

Die vom Beton aufgenommene Feuchtigkeit kann dann für jede der Lagerungen mit Gleichung 4-10 bestimmt werden. Anhand der Ergebnisse (siehe 5.3.3) kann eine Aussage zur Wasseraufnahme aus der Luft des jeweiligen Betons getroffen werden.

$$A_W = \frac{m_f - m_t}{m_t} * 100 \quad \text{Gleichung 4-10}$$

mit:

A_W ... Wasseranteil im Probekörper (%), m_f ... Masse des feuchten Probekörpers (g),
 m_t ... Masse des trockenen Probekörpers (g)

4.6 pH Messung über den Querschnitt

Eine gängige Methode der Bestimmung der Karbonatisierungstiefe ist die Phenolphthalein-Prüfung nach ÖNorm EN 14630 (2007-01-01). Für diese Prüfung wird ein frisch gebrochener Betonquerschnitt mit einer Lösung aus 1 g Phenolphthalein, 70 ml Ethylalkohol und 100 ml entionisiertem Wasser besprüht. Die Indikatorlösung ändert seine Lichtabsorptionseigenschaften beim Wechsel von einem sauren zu einem basischen Milieu in einem Umschlagsbereich von 8,2-9,8 von farblos auf rot-violett (Bannwarth u. a., 2011). Der verfärbte Bereich besitzt laut Norm ausreichende Alkalität, um etwaigen Bewehrungsstahl im Beton vor Korrosion zu schützen (ÖNorm EN 14630: 2007-01-01)

Es ist bekannt, dass Phenolphthalein Krebs verursacht und der Einsatz dessen sollte vermieden werden (Dunnick & Hailey, 1996). Die Phenolphthalein-Messmethode gibt zudem keine genaue Auskunft über den pH-Verlauf über den Querschnitt. Dies war unter anderem Motivation für Herrn Dr.rer.nat. BSc MSc Cyrill Grengg und seine Kollegen eine alternative Methode zur pH-Messung über den Querschnitt zu entwickeln, die in Kooperation mit diesen für die Messung der Proben aus 3.3 verwendet wurde.

Bei der hochauflösenden, optischen Oberflächen-pH-Wertmessung nach Grengg u. a. (2019) wird das Prinzip des time-domain dual lifetime referencing (kurz: t-DLR) Schröder u. a. (2005) angewandt. Dabei wird ein fluoreszierender Indikatorfarbstoff (in Abb. 4-10 als „indicator dye“) mit einer kurzen Lebensdauer (Nanosekunden) mit einem Referenzpigment (in Abb. 4-10 als „reference dye“) mit langer Lebensdauer (Mikrosekunden) kombiniert. Beide Farbstoffe können mit rotem Licht angeregt werden und strahlen im Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums. Die Farbstoffe sind, wie in Abb. 4-10 schematisch dargestellt, auf einer Polyethylenterephthalat-Folie aufgebracht. Im Versuchsablauf wird diese Folie in einer 150 mM Natriumchloridlösung (NaCl) eingeweicht und auf die zu messende Betonoberfläche aufgebracht. Für die t-DLR-Messung wird ein Bild mit Beleuchtung (der Indikatorfarbstoff und das Referenzpigment geben ein Signal ab) und ein Bild ohne Beleuchtung (nur das Referenzpigment gibt ein Signal ab) aufgenommen. Diese Bilder werden dann mit einem Python Skript voneinander abgezogen und es ergibt sich das gewünschte pH-Bild. (Grengg u. a., 2019)

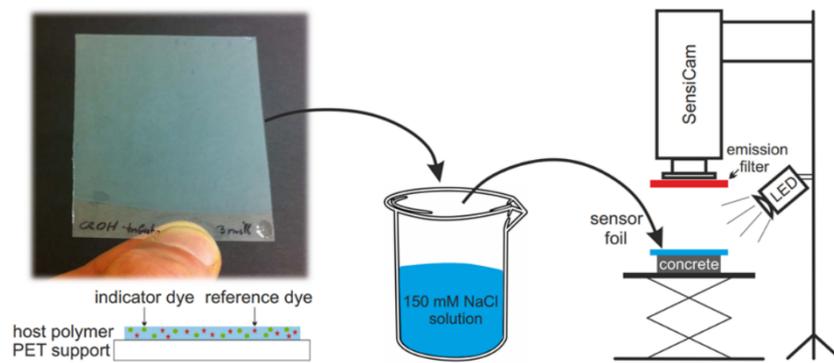


Abb. 4-10: Prinzip der optische pH-Messung (Müller u. a., 2018, mod.)

Diese Methode wurde durch Müller u. a. (2018) durch Verwendung von zwei Indikatorfarbstoffen verbessert und ermöglicht eine pH-Messung im Bereich von 6,5 – 12,5.

Am 07.08.2018 wurde der beschriebene Versuchsaufbau am Institut für Analytische Chemie und Lebensmittelchemie aufgebaut. Die in Abb. 4-11 abgebildete SensiCam von PCO mit einer 12 mm PENTAX TV Linse und einem RG 9 Emissionsfilter wurde zur Aufnahme der Bilder verwendet.

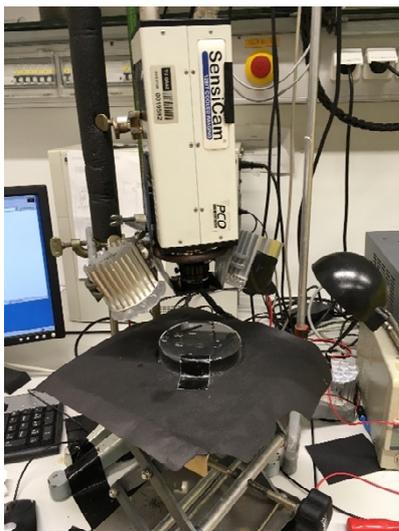


Abb. 4-11: Versuchsaufbau optische pH-Messung

Die zwei in Abb. 4-11 seitlich an der SensiCam positionierten Led-Hochleistungslampen LR CP7P von OSRAM Opto Semiconductors GmbH beleuchteten die Proben während der Aufnahme (siehe Abb. 4-12).

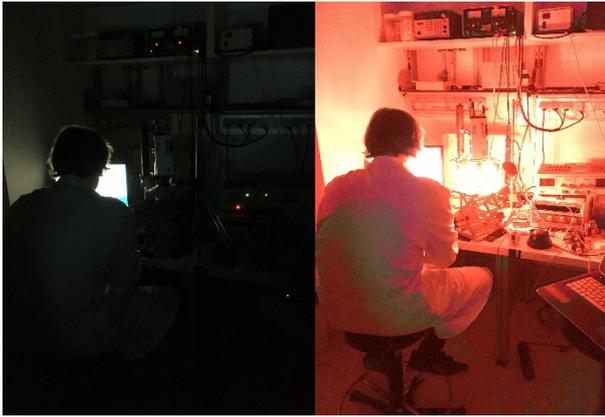


Abb. 4-12: Aufnahme ohne Beleuchtung (links) und mit Beleuchtung (rechts)

Die Proben wurden vor der Messung mit einer Diamantsäge auf eine Dicke von ca. 0,5 cm glatt geschnitten und in einem Exsikkator in einem Vakuum gelagert.



Abb. 4-13: Geschnittene poröse UHPC-Probe

Abb. 4-14 zeigt das Ergebnis der Bildanalyse der porösen UHPC-Probe nach Bearbeitung mit dem Phytton Skript. Es wurden 18 Bilder pro Betonvariation analysiert (siehe Anhang I). Der gelbliche Bereich zeigt den basischen Bereich des Betons. Für diese Arbeit ist der Grenzbereich der Probe interessant, der wie in Abb. 4-14 zu erkennen ist, unter den im Bauwesen standardmäßig festgelegten pH-Wert von 9 fällt.

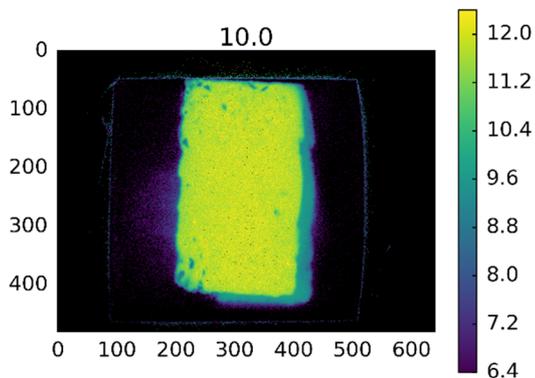


Abb. 4-14: Optische pH-Messung poröser UHPC

4.7 pH Diffusionsprüfung

Eine Säure ist ein Stoff, der Wasserstoffionen dissoziiert. So dissoziiert eine Säure in einer wässrigen Lösung in H^+ -Ionen. Als Base bezeichnet man Stoffe die Protonen aufnehmen, welche in wässriger Lösung als Lauge bezeichnet werden. Säuren geben also Protonen ab, welche eine Lauge aufnehmen kann. Bei der Reaktion von Säuren mit Basen findet in weiterer Folge eine Neutralisation statt, bei der die Säure- und Baseneigenschaften aufgehoben werden und Salze entstehen. (Bannwarth u. a., 2011)

Wenn zwei Stoffe miteinander in Berührung stehen und sie sich durch ihre innere Eigenbewegung vermischen, dann spricht man von Diffusion (Stefan, 1889). Da die im Botanischen Garten der Universität Graz ausgelagerten Betone mit Regenwasser in Kontakt kommen, wurden zwei Versuche hinsichtlich einer etwaigen Veränderung des oberflächlichen pH-Werts durch Regenwasserkontakt angedacht.

Der erste Versuch basiert auf einer Oberflächen pH-Messung mit einer Indikatorlösung. Da der Umschlagsbereich von Phenolphthalein (siehe 4.6) als Oberflächen pH-Wert nicht sauer genug ist, wurde Methylrot gewählt. Der Umschlagsbereich von Methylrot liegt bei 4,4-6,2 und schlägt beim Übergang vom sauren Bereich in den basischen von Rot auf orange-gelb um. (Bannwarth u. a., 2011). Regenwasser ist pH-neutral, daher wurde den Versuch entionisiertes Wasser verwendet. Es hat bei 23°C einen pH-Wert von ca. 7. Für den Versuchsaufbau (siehe Abb. 4-15) wurden die Proben auf einer pH-neutralen Unterkonstruktion ca. 5 mm in das entionisierte Wasser eingetaucht. Es wurde während der Versuchsdurchführung mit einem WTW Multi 3420 Multiparametermessgerät (siehe Abb. 4-15 rechts), bestückt mit einer WTW SenTix 940 pH-Elektrode, die Veränderung des pH-Werts des entionisierten Wassers gemessen. Nach einer Wasserlagerung von 2, 4 und 6 Tagen wurde jeweils eine der drei gelagerten Proben pro Betonvariation entnommen und mit Methylrot beträufelt (siehe Abb. 4-16). Anhand der Verfärbung kann festgestellt werden, ob der Beton oberflächlich einen pH-Wert von ca. 6, oder höher aufweist (pH-Wert < 4,4-6,2 -Rot, pH-Wert > 4,4-6,2 -orange-gelb).

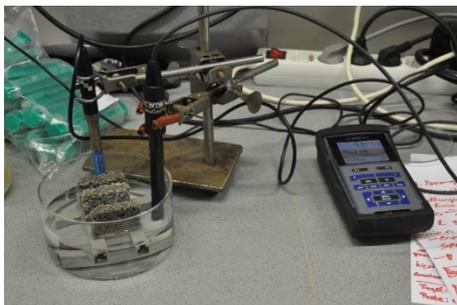


Abb. 4-15: Versuchsaufbau 1. Diffusionsprüfung



Abb. 4-16: 1. Diffusionsprüfung: Indikatorlösung auf Drainbeton nach 2 Tagen

Beim zweiten Versuch wurden die Betonproben 14 Tage in einem geschlossenen Behälter in 5 mm entionisiertem Wasser gelagert (siehe Abb. 4-17 links). Die pH-Wertmessung wurde danach mithilfe einer Extech CL200 Chloridsonde mit einem Extech PH105 pH Elektrodenmodul (siehe Abb. 4-17 rechts) und durch Beträufeln mit Methylrot durchgeführt.



Abb. 4-17: Lagerung 2. Diffusionsprüfung (links), Chloridsonde mit pH Elektrodenmodul (rechts)

4.8 Mikroskopie

Die Mikroskopie-Oberflächenanalyse der Betonproben wurde mit einem Keyence VHX-5000 Digitalmikroskop mit einem VH-Z20R Zoomobjektiv durchgeführt. Das Objektiv erlaubt Zoomeinstellungen von 20-facher, bis 200-facher Vergrößerung. In diesem Projekt wurde eine 50-fache und eine 150-fache Vergrößerung gewählt. Das VHX-5000 Digitalmikroskop kann Tiefscharfe 3D Bilder über eine definierte Fläche aufnehmen (siehe Abb. 4-18).



Abb. 4-18: Tiefenscharfes Bild – Drainbeton

Dieses tiefenscharfe 3D Bild kann nun mit Software von Keyence hinsichtlich seiner Oberflächeneigenschaften analysiert werden. Im Falle dieses Projekts wurden die Betonproben bei 50-facher Vergrößerung optisch bemessen und die Differenz zwischen Hoch- und Tiefpunkten der Oberfläche ausgelesen (siehe Abb. 4-19).

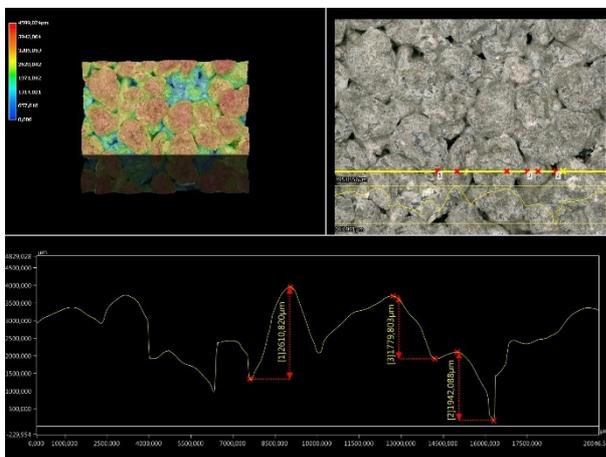


Abb. 4-19: Lineare Analyse Drainbeton

Bei 150-facher Vergrößerung wurden geschnitten und geschliffene Betonproben auf ihre Oberflächeneigenschaften im Querschnitt näher betrachtet. Die Tiefen und der Durchmesser der Porenräume der Schnittfläche wurden optisch ausgelesen. Abb. 4-20 zeigt die optische Analyse einer Luftpore im Normalbetonquerschnitt.

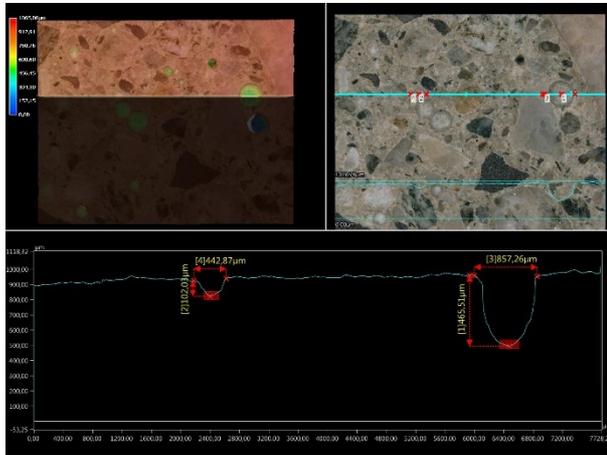


Abb. 4-20: Luftpore Normalbeton

4.9 Bildanalyse Mooswachstum

Die wie in 3.5 beschrieben, ausgelagerten Betonproben wurden an 5 Terminen (in Abb. 4-21 von links nach rechts: 06.06.2018, 20.06.2018, 07.05.2018, 24.07.2018, 05.10.2018) fotodokumentiert. Dafür wurde jede Probe einzeln aus ca. 1 m Höhe mit einer Nikon D90 digitalen Spiegelreflexkamera mit einem Nikon AF-S DX Micro-Nikkor 40 mm 1:2,8G Objektiv fotografiert. Jedes Bild enthält einen Größenindikator (einen Zollstock) über welchen die Fläche der Moose bestimmt werden kann.



Abb. 4-21: Fotodokumentation Drainbeton (D-Sch-K-3)

Die Moosarten der letzten Probenaufnahme am 05.10.2018 wurden von Herrn Dipl.-Biol. Dr.rer.nat.habil. Christian Berg identifiziert. Ihr Wachstum und Gesamtzuwachs wurde mithilfe einer optischen Farbanalyse wie folgt bestimmt.

4.9.1 Gesamtzuwachs an Moosfläche aller Moosarten (Mooszuwachs)

Um den Gesamtzuwachs des Moores auf der betrachteten Probe zu bestimmen muss zuerst die gesamte Moosfläche Probe vom 05.10.2018 mit dem Lasso-Tool umrahmt werden (siehe Abb. 4-22).

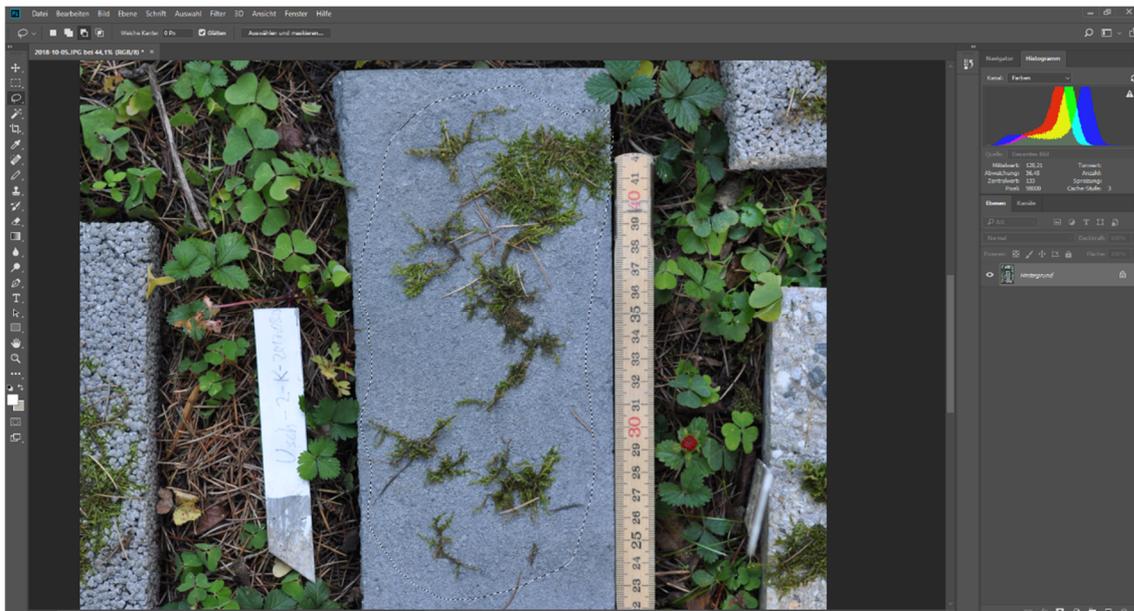


Abb. 4-22: Auswahl der gesamten Moosfläche vom 05.10.2018 mit Lasso-Tool

Als nächstes wird mit dem Reiter „Auswahl“ die Funktion „Farbbereich“ gewählt werden. Es öffnet sich ein Fenster, in welchem eine Farbtoleranz ausgewählt

werden kann (zur Farbanalyse wird eine Toleranz zwischen 60 und 80 empfohlen). In der Auswahlvorschau soll „Schwarzer Hintergrund“ eingestellt sein. Mit gehaltener Shift- und Strg-Taste kann nun mit dem „Pipette“ Tool die gesuchte Farbe angeklickt werden (siehe Abb. 4-23)

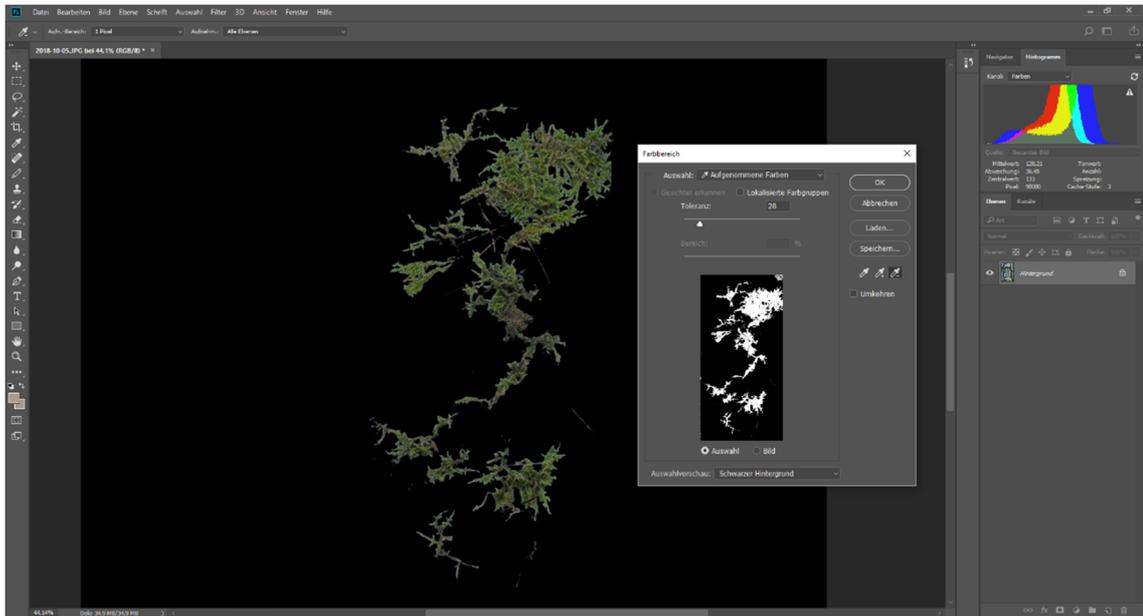


Abb. 4-23: Farbauswahl

Wird die Eingabe bestätigt, so gibt Photoshop den Bereich des eingestellten Farbbereichs aus.



Abb. 4-24: Ausgewählte Gesamtfläche des Moores

In der rechten oberen Ecke des Programms kann man nun mit der „Histogramm“ Funktion (siehe Abb. 4-28) die ausgewählte Pixelanzahl ausgelesen werden. Falls im Histogramm ein Rufezeichen angezeigt wird, muss dieses angeklickt werden, um die Pixelanzahl zu aktualisieren.

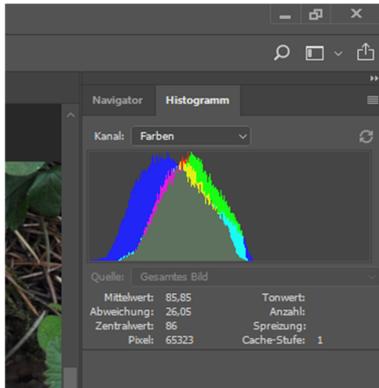


Abb. 4-25: Histogramm

Als nächster Schritt wird mit dem „Polygon-Lasso“ Tool eine bekannte Referenzfläche (siehe Abb. 4-26) ausgewählt (in diesem Fall der Zollstock) und die Pixelanzahl aus dem Histogramm ausgelesen.



Abb. 4-26: Referenzfläche

Mit dem Verhältnis der Fläche zur Pixelanzahl kann nun mit der bekannten Referenzfläche nach Gleichung 4-11 die exakte Moosfläche berechnet werden.

$$A_{M,i} = \frac{P_{M,i} * A_{R,i}}{P_{R,i}} \quad \text{Gleichung 4-11}$$

mit:

$A_{M,i}$... Moosfläche (cm^2), $P_{M,i}$... Pixelanzahl der Moosfläche (cm^2), $P_{R,i}$... Pixelanzahl der Referenzfläche (cm^2), $A_{R,i}$... Referenzfläche (cm^2)

Dieser Ablauf wird mit der gesamten Moosfläche der Probe vom 06.06.2018 wiederholt, startend beim Einrahmen der gesamten Moosfläche (siehe Abb. 4-27).



Abb. 4-27: Auswahl der gesamten Moosfläche von 06.06.2018 mit Lasso-Tool

Dadurch erhält man die Moosfläche der Probe am 05.10.2018 und am 06.06.2018. Der Gesamtzuwachs an Moosfläche aller Moosarten, bzw. der Mooszuwachs kann mit Gleichung 4-12 bestimmt werden.

$$MZ_i = \frac{A_{M,05.10.,i}}{A_{M,06.06.,i}} * 100 \quad \text{Gleichung 4-12}$$

mit:

MZ_i ... Mooszuwachs (%), $A_{M,05.10.,i}$... Moosfläche am 05.10.2018 (cm^2), $A_{M,06.06.,i}$... Moosfläche am 06.06.2018 (cm^2)

4.9.2 Mooswachstum der einzelnen Moosarten

Die von Herrn Dipl.-Biol. Dr.rer.nat.habil. Christian Berg einzeln bestimmten Moose auf den Betonproben werden unabhängig von ihren umgebenden Moosen betrachtet.

Das zu analysierende Moos wird im Foto mit dem Lasso-Tool ausgewählt. Abb. 4-28 zeigt eine poröse UHPC-Platte, auf welcher *Hypnum cupressiforme* mit dem Lasso-Tool umrahmt wurde.

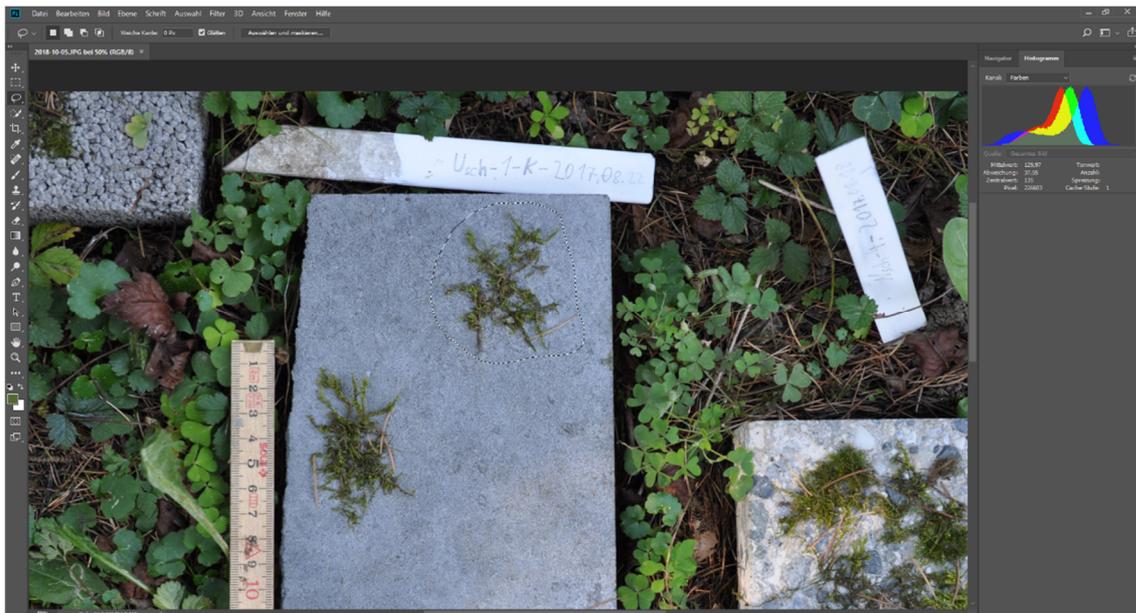


Abb. 4-28: Auswahl von *Hypnum cupressiforme* vom 05.10.2018 mit Lasso-Tool
Als nächstes muss unter dem Reiter „Auswahl“ die Funktion „Farbbereich“ gewählt werden. Es öffnet sich ein Fenster, in welchem eine Farbtoleranz ausgewählt werden kann (zur Farbanalyse wird eine Toleranz zwischen 60 und 80 empfohlen). In der Auswahlvorschau soll „Schwarzer Hintergrund“ eingestellt sein. Mit gehaltener Shift- und Strg-Taste kann nun mit dem „Pipette“ Tool die gesuchte Farbe angeklickt werden (siehe Abb. 4-29).

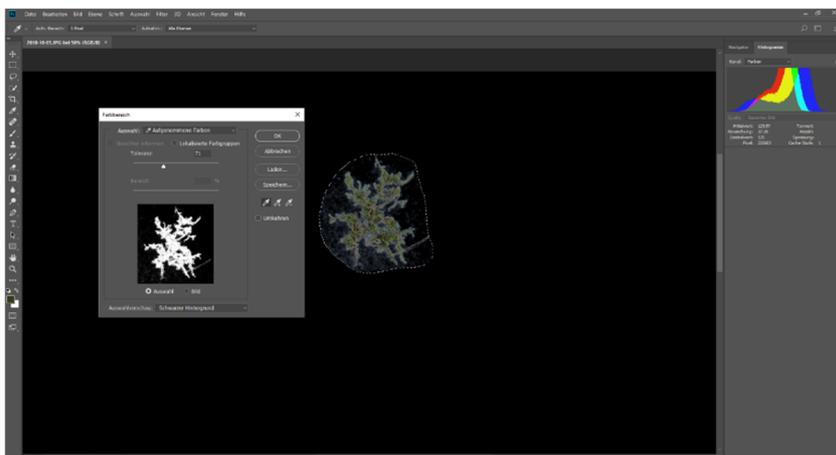


Abb. 4-29: Farbauswahl

Wenn die Eingabe bestätigt wird, wählt Photoshop den Bereich des eingestellten Farbspektrums aus (siehe Abb. 4-30).



Abb. 4-30: Ausgewählte Moosfläche von *Hypnum cupressiforme*

In der rechten oberen Ecke des Programms kann man nun mit der „Histogramm“ Funktion (siehe Abb. 4-31) die ausgewählte Pixelanzahl ausgelesen werden. Falls im Histogramm ein Rufzeichen angezeigt wird, muss dieses angeklickt werden, um die Pixelanzahl zu aktualisieren.

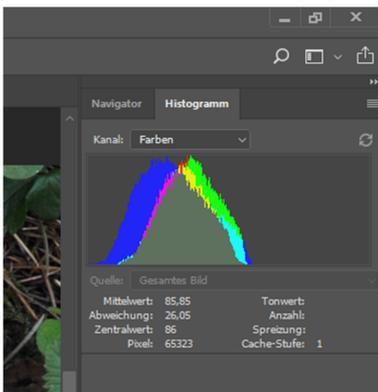


Abb. 4-31: Histogramm

Nun wird mit dem „Polygon-Lasso“ Tool eine bekannte Referenzfläche (siehe Abb. 4-32) ausgewählt (in diesem Fall der Zollstock) und die Pixelanzahl aus dem Histogramm ausgelesen.



Abb. 4-32: Referenzfläche

Mit dem Verhältnis der Fläche zur Pixelanzahl kann nun mit der bekannten Referenzfläche nach Gleichung 4-10 die exakte Moosfläche berechnet werden.

Dieser Ablauf wird mit der Moosfläche desselben Moores vom 06.06.2018 wiederholt, startend beim Einrahmen der Moosfläche (siehe Abb. 4-33).



Abb. 4-33: Auswahl von *Hypnum cupressiforme* vom 06.06.2018 mit Lasso-Tool

Dadurch erhält man die Fläche des einzelnen betrachteten Moores am 05.10.2018 und am 06.06.2018. Das Mooswachstum dieser Art kann nun anhand von Gleichung 4-13 bestimmt werden.

$$MW_i = \frac{A_{ME,05.10.,i}}{A_{ME,06.06.,i}} * 100 \quad \text{Gleichung 4-13}$$

mit:

MW_i ... Mooszuwachs (%), $A_{ME,05.10.,i}$... Einzelfläche der betrachteten Moosart am 05.10.2018 (cm^2), $A_{ME,06.06.,i}$... Einzelfläche der betrachteten Moosart am 06.06.2018 (cm^2)

4.10 Betonfeuchtigkeitsmessung der Auslagerungsproben

Parallel zur Fotodokumentation (siehe 4.9) wurde an den Aufnahmetagen (06.06.2018, 20.06.2018, 07.05.2018, 24.07.2018, 05.10.2018) mit einem Tramex CMEXPERT II kapazitiven Feuchtemessgerät (siehe Abb. 4-34) auf der Ober- und Unterseite die oberflächliche Betonfeuchtigkeit gemessen. Dies erfolgte an vier verschiedenen Punkten (links, rechts, oben und unten) der Oberseite der Probe. Die Unterseite der Proben unterliegt einer geringeren Streuung, es wurde daher nur eine Messung durchgeführt. Die Ergebnisse der Messung sind in 5.5 aufgelistet.



Abb. 4-34: Tramex CMEXPERT II

5 Ergebnisse

Die in 3.2 beschriebenen Anforderungen an den Beton hinsichtlich des Mooswachstums wurden mit den in 4 angeführten Messmethoden analysiert. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Auflistung der relevanten Ergebnisse. Tabelle 5-1 zeigt eine Auflistung der Ergebnisse der Messungen an den Betonen. Eine grafische Darstellung und Beschreibung findet man in den folgenden Unterkapiteln.

Tabelle 5-1: Auflistung Messergebnisse von porösem UHPC, NB, DB und SB

Methode	Kenngröße	Einheit	Ergebnisse				Kommentar
			poröser UHPC	NB	DB	SB	
Biegezugfestigkeitsprüfung	Biegezugfestigkeit	MPa	10,91	7,27	3,38		Kein Einfluss auf Mooswachstum.
Sandflächenverfahren	Rautiefe	mm	0,8	1,0	1,5	1,4	Wirkt sich direkt auf den Mooszuwachs am Beton aus.
Mikroskopie	Einzelrautiefe	mm	0,95	0,76	2,47	1,65	Da es sich bei der Mikroskopiemessung um eine Stichprobenmessung handelt, sind diese Ergebnisse nur unterstützend für das Sandflächenverfahren anzusehen.
	Durchmesser der Porenräume der Schnittfläche	mm	0,53	0,66	1,4	1,22	
	Tiefe der Porenräume der Schnittfläche	mm	0,22	0,44	1,41	0,76	
Kapillare Wasseraufnahme	Wasseraufnahmekoeffizient nach 5 min	$\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$	35	20	312	303	Es zeigt sich, dass der DB und SB innerhalb von 5 min kapillar gesättigt sind. Das aufgenommene Wasser wird auch schnell wieder abgegeben.
	Wasseraufnahmekoeffizient nach 24 h	$\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$	10	8	gesättigt	gesättigt	Nach 24 h nähern sich der poröse UHPC und der NB ihrem Sättigungsgehalt

Ergebnisse

			poröser UHPC	NB	DB	SB	
	Wasseraufnahme nach 24 h	%	4,4	3,4	7,3	7,1	Die kapillar aufgenommene Wassermenge nach 24 h zeigt, dass sich DB und SB von NB und porösen UHPC abheben.
Porositätsbestimmung	Rohdichte	kg/m ³	2275	2350	2151	2139	
	Reindichte	kg/m ³	2755	2746	2734	2704	
	Offene Porosität	%	15,2	12,4	18,1	18,8	Zeigt die Menge untereinander verbundenen Porenräume an.
	Gesamtporosität	%	17,1	15,0	21,1	20,7	Zeigt die totale Menge an Porenräumen.
	Gesamtwasseraufnahme	%	6,7	5,3	8,4	8,8	Wasseraufnahme der Proben in einem Vakuum.
Absorptionisotherme	Ausgleichsfeuchte	%	Siehe Abb. 5-16				Zeigt eindeutig, dass der poröse UHPC am meisten Feuchtigkeit aus der Luft aufnimmt.
pH Messung über den Querschnitt	Karbonatisierungstiefe	mm	~0,5	~6,0	undefiniert	~10,8	Die Karbonatisierungstiefe liegt bei den explizit mit CO ₂ behandelten Proben bei etwa 4-10 mm.
pH Diffusionsprüfung	Senkung der Oberflächen pH-Werts		Erst nach 14 Tagen Lagerung in deionisiertem Wasser konnte eine Farbänderung der Indikatorlösung (und somit eine Änderung des pH-Werts) festgestellt werden.				

5.1 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit, wird wie in 4.1 beschrieben gemessen. Sie wird als Vergleichsfaktor der mechanischen Belastbarkeit der Platten angeführt.

Wie Abb. 5-1 illustriert, setzten sich die Betone dieser Versuchsreihe hinsichtlich ihrer Biegezugbelastbarkeit deutlich voneinander ab. Der Drainbeton weist mit 3,38 N/mm² die geringste Biegezugfestigkeit der betrachteten Betone auf. Der Normalbeton erreicht einen Wert von 7,27 N/mm², welcher dem 2,15-fachen des Drainbeton entspricht. Den höchsten Biegezugfestigkeitswert erreicht der poröse UHPC mit 10,91 N/mm². Die gemessenen Werte weichen bis zu 1,53 N/mm² von diesem Wert ab.

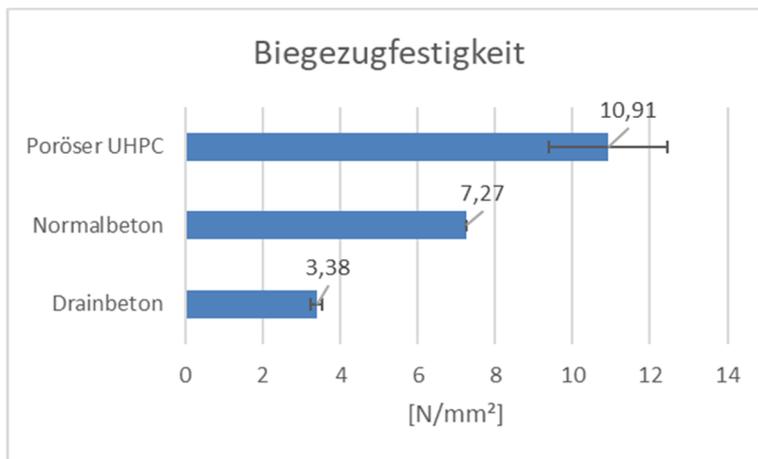


Abb. 5-1: Biegezugfestigkeit von porösem UHPC, Normalbeton und Drainbeton

5.2 Rauigkeit

Die Evaluierung der Oberflächenrauigkeit der Betonproben wurde mit dem Sandflächenverfahren nach ZTV-ING (2018-01) (siehe 4.2) und durch Oberflächenanalyse mit einem Digitalmikroskop (siehe 4.8) durchgeführt.

Wie Abb. 5-2 zeigt, weist der poröse UHPC-Beton mit 0,8 mm durchschnittlicher Rautiefe die geringste Rauigkeit der betrachteten Betone auf. Darauf folgt der Normalbeton mit 1,0 mm, dies entspricht einer Steigerung der Rauigkeit um 25 %. Die 1,5 mm Rautiefe des Drainbetons sind die höchsten erreichten Werte der Messung und sind auf die Kornverteilung (3-3,5 mm) der Betonmischung zurückzuführen. Dies entspricht einer Steigerung von ca. 88 % gegenüber des porösen UHPC-Betons. Die hohe Rautiefe des Drainbetons ist direkt auf sein grob haufwerksporiges Gefüge zurückzuführen. Würde man bei seiner Herstellung eine weiter reichende Kornverteilung verwenden, so würde der Kornzwischenraum gefüllt und seine Rautiefe verringert werden. Der Substratbeton weist eine leicht verringerte Rautiefe im Vergleich zum Drainbeton auf. Der eingepresste Ton füllt den oberflächlichen Haufwerksporenraum des Betons aus. Es verbleibt nur die oberflächliche Rauigkeit, was zu dem geringeren Rautiefenwert führt. Die Standardabweichung aller Rautiefenmesswerte beträgt weniger als 0,05 mm.

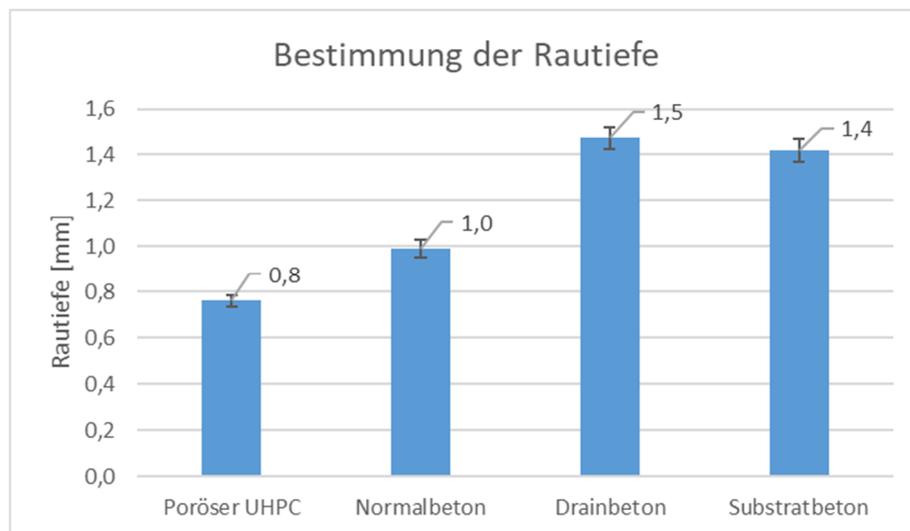


Abb. 5-2: Bestimmung der Rautiefe von porösem UHPC, NB, DB und SB

Die Messung mit dem Digitalmikroskop erfolgt anhand von Stichproben der betrachteten Oberfläche. Die nachfolgenden Ergebnisse sind daher nur unterstützend zu den Ergebnissen der Rautiefenmessung anzusehen. Wie Abb. 5-3 zeigt, ergab die Messung, dass der Normalbeton mit 0,76 mm eine geringere Rautiefe als der poröse UHPC-Beton mit 0,95 mm aufweist. Dies kann einerseits auf die erhöhte Messstreuung des Normalbetons, sowie auch auf die betrachtete Messfläche zurückgeführt werden. Wie auch die Messung mit dem Sandflächenverfahren, so ergibt die Mikroskopiemessung, dass der Drainbeton mit 2,47 mm die höchste Rauigkeit der betrachteten Betone aufweist, gefolgt vom Substratbeton mit 1,65 mm.

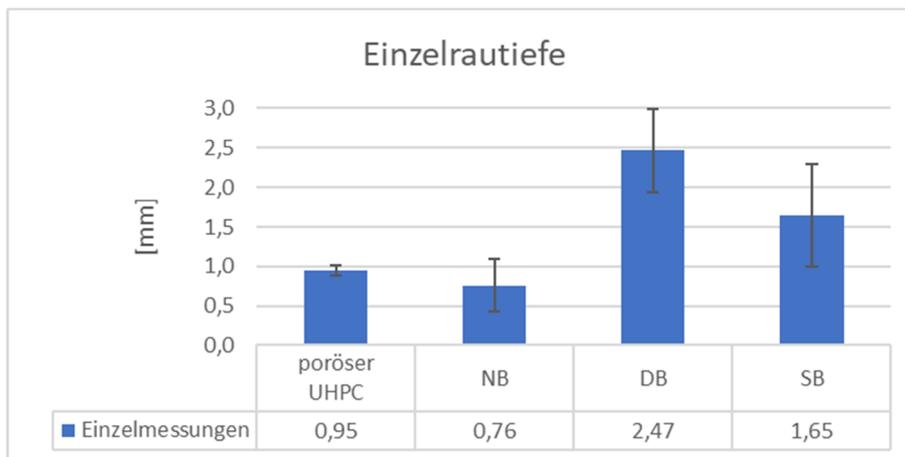


Abb. 5-3: Einzelrautiefe von porösem UHPC, NB, DB und SB

Die Schnittflächenanalyse bezieht sich nicht auf die Oberflächenrauigkeit des Betons, sondern auf Porigkeit der Betonschnittfläche und wird hier als ergänzender Faktor angeführt. Dazu wird der Durchmesser der geschnittenen Poren gemeinsam mit der Tiefe der Poren betrachtet. So haben die dichten Betone (poröser UHPC und Normalbeton) nach Abb. 5-4 nahe aneinander liegende Porendurchmesser. Da beim porösen UHPC nur Verdichtungsporen im Querschnitt festgestellt werden konnten, sind diese für diesen Vergleich herangezogen worden. Sie sind aber als nicht repräsentativ zu betrachten und in Abb. 5-4 als Ausfall gekennzeichnet (strichliert). Bei dem betrachteten Porenraum des Normalbetons handelt es sich um Luftporen, welche doppelt so tief sind, wie die am porösen UHPC-Beton gemessenen Verdichtungsporen. Ein ähnliches Verhältnis ergibt sich beim Vergleich der Haufwerksporen des Drainbeton und dem tonverpressten Teil des Substratbeton. Die Ergebnisse unterliegen zwar einer starken Streuung, aber trotzdem zeichnet sich bei ähnlichen Werten der Durchmesser (1,4 mm DB und 1,22 mm SB) eine beinahe doppelte Tiefe der Haufwerksporen des Drainbetons ab.

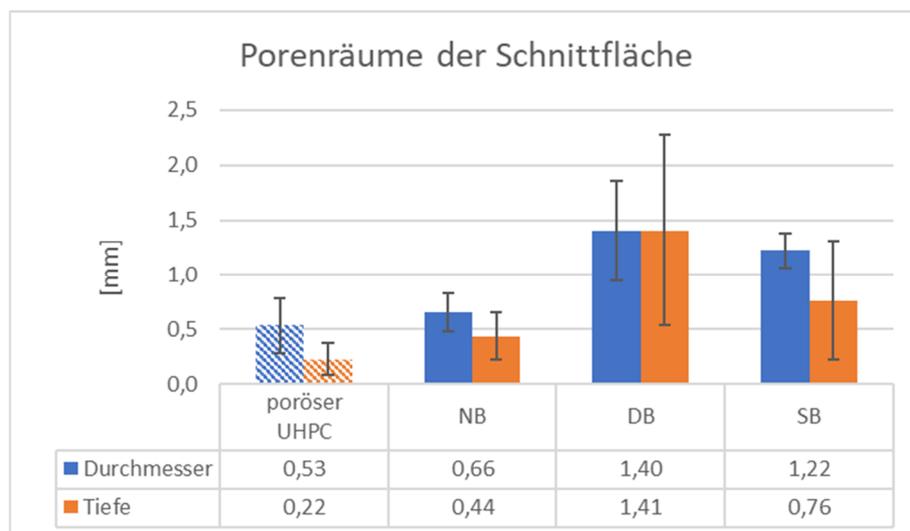


Abb. 5-4: Porenräume der Schnittfläche von porösem UHPC, NB, DB und SB

Der Beton mit der höchsten Oberflächenrauigkeit der Versuchsreihe ist der Drainbeton. Dieser ist nach der Rautiefenbestimmung mit dem Sandverfahren um 88 % und bei der Einzelrautiefenbestimmung um 160 % rauer als der poröse UHPC, welcher hinsichtlich der Rauigkeit das Negativbeispiel des Versuches darstellt. Der Substratbeton ist der zweitrauste Beton mit einer Rauigkeitsdifferenz zum porösen UHPC im Sandflächenverfahren von 75 % und der Einzelmessung von 74 %. An vorletzter Stelle steht der Normalbeton, welcher nach dem Sandflächenverfahren um 25 % rauer, aber nach den Einzelmessungen um 20 % weniger rau als der poröse UHPC ist.

5.3 Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahmeeigenschaften des Betons wurden im Rahmen dieser Arbeit anhand der kapillaren Wasseraufnahme, der Bestimmung seiner Dichte, Porosität, Gesamtwasseraufnahme und seiner Absorptionsisotherme analysiert.

5.3.1 Kapillare Wasseraufnahme

Die Ergebnisse der kapillaren Wasseraufnahme der Betonproben variieren stark zwischen den dichteren Betonvariationen (poröser UHPC und Normalbeton) und der Drainbetonmischung, bzw. des Substratbetons.

Wie Abb. 5-5 zeigt, nahm der poröse UHPC innerhalb von 20 Minuten beinahe 1000 Gramm Wasser pro Quadratmeter auf. Wie später in diesem Kapitel noch weiter gezeigt wird, überschreitet dies die Wasseraufnahme des Normalbetons in diesem Zeitraum. Nach 24 h nahm der poröse UHPC 3042 g Wasser pro Quadratmeter auf.

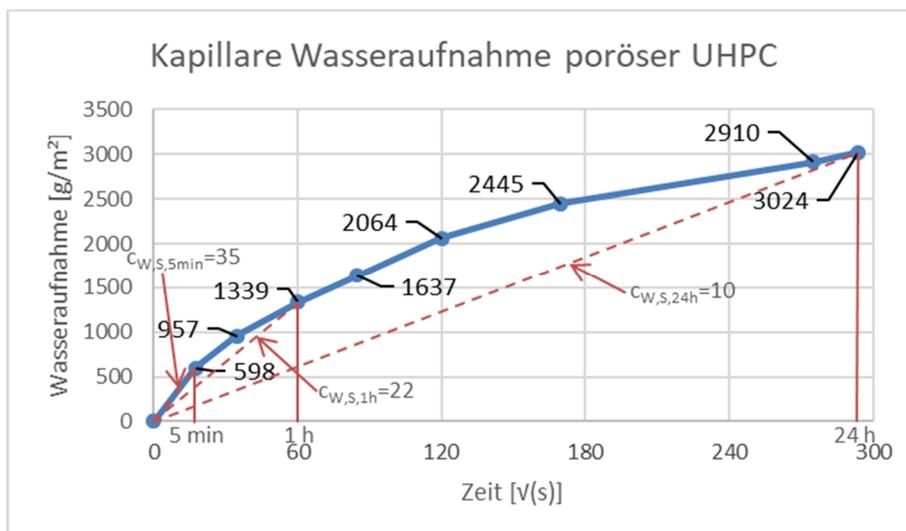


Abb. 5-5: Kapillare Wasseraufnahme poröser UHPC

Für die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten eines Baustoffes ist die Steigung der Wasseraufnahme über die Wurzel der Zeit relevant (siehe Tabelle 5-2). Dazu wird der lineare Anstieg der anfänglichen Wasseraufnahme betrachtet. Es wird zu Vergleichszwecken der 24 h-Wasseraufnahmekoeffizient von $10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$ herangezogen, bzw. zum Vergleich zum Drain- und Substratbeton der 5 min- Wasseraufnahmekoeffizient von $33 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$.

Tabelle 5-2: Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient poröser UHPC

Messung nach:	5 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	21 h	24 h
$\sqrt{\text{s}}$	17	35	60	85	120	170	275	294
$c_{w,s}$ [g/(m ² ·√(s))]	35	28	22	19	17	14	11	10

Abb. 5-6 zeigt den Verlauf der Wasseraufnahme des geprüften Normalbetons über 24 h. Dieser nahm im Vergleich zu den anderen Betonen am wenigsten

Wasser auf. So beträgt der gemessene Wert für aufgenommene Gramm Wasser pro Quadratmeter nach 20 Minuten 640. Dies ist um 33 % weniger als der poröse UHPC-Beton in derselben Zeit aufnahm. Der gemessene Wert nach 24 h beträgt 2329 g/m², welcher um ca. 23 % kleiner als der des porösen UHPC-Betons ist.

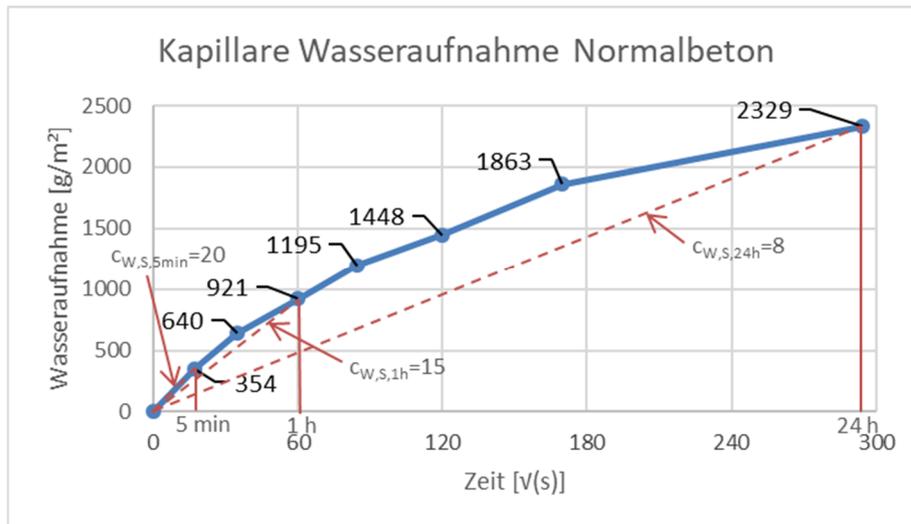


Abb. 5-6: Kapillare Wasseraufnahme Normalbeton

Wie auch beim porösen UHPC ist auch bei der Messung des Normalbetons der lineare Anstieg der anfänglichen Wasseraufnahme nicht abgeschlossen und es wird der 24 h Wert des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten genommen. Tabelle 5-3 zeigt die Steigungen der Wasseraufnahme zu den jeweiligen Messpunkten. Der Wasseraufnahmekoeffizient nach 24 stündiger Lagerung beträgt 8 g/(m²·√(s)) und ist somit um 20% kleiner als der Wasseraufnahmekoeffizient des porösen UHPC-Betons. Der 5 min- Wasseraufnahmekoeffizient beträgt zudem 20 g/(m²·√(s)).

Tabelle 5-3: Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient Normalbeton

Messung nach:	5 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	24 h
√(s)	17	35	60	85	120	170	294
c _{w,s} [g/(m ² ·√(s))]	20	18	15	14	12	11	8

Wie in Abb. 5-7 zu erkennen ist, wurden zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme der Drainbetonproben zu Beginn der Prüfung kürzere Messintervalle gewählt, als beim porösen UHPC und Normalbeton. Dadurch konnte festgestellt werden, dass bereits nach 5 Minuten der lineare Bereich der anfänglichen Wasseraufnahme verlassen wurde. Danach pendelt sich das gemessene Wassergewicht pro Quadratmeter auf einen Wert von ca. 5400 g ein. Dieser Wert entspricht der 2,3-fachen Wasseraufnahme des Normalbetons und der 1,75-fachen Wasseraufnahme des porösen UHPC nach 24 h.

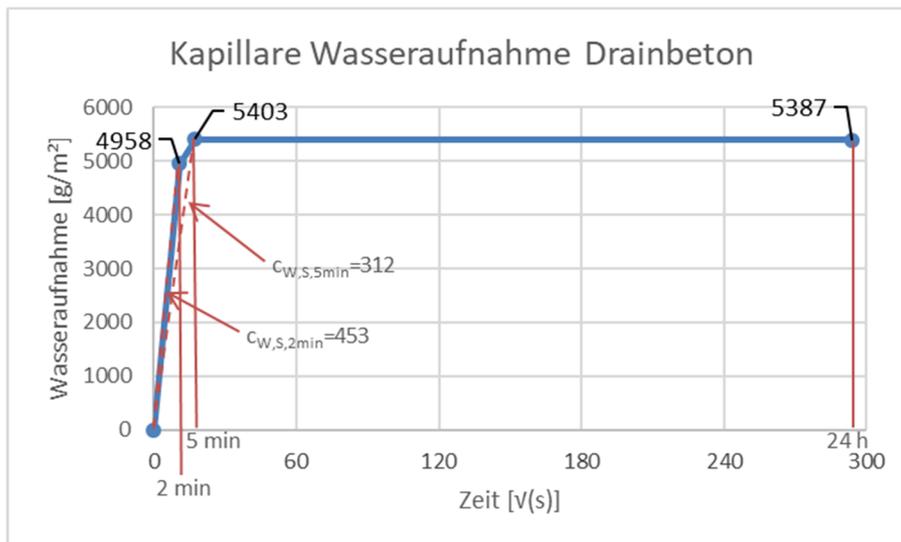


Abb. 5-7: Kapillare Wasseraufnahme Drainbeton

Tabelle 5-4 zeigt die relevanten Ergebnisse der Messung. Die aufgenommene Wassermenge ist nach Minute 5 als konstant anzusehen. Der Wasseraufnahmekoeffizient des Drainbetons beträgt $312 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$. Dieser Wert entspricht der 15,5-fachen Wasseraufnahmegeschwindigkeit des Normalbetons und der 9-fachen Wasseraufnahmegeschwindigkeit des porösen UHPC-Betons.

Tabelle 5-4: Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient Drainbeton

Messung nach:	2 min	5 min	24 h
$\sqrt{\text{s}}$	11	17	294
$c_{w,s}$ [g/(m ² ·√(s))]	453	312	gesättigt

Ergebnisse

Die Wasseraufnahme des Substratbetons verläuft gleich wie beim Drainbeton und auch die gemessenen Wassergewichtswerte entsprechen denen der Drainbetonmessung (siehe Abb. 5-8).

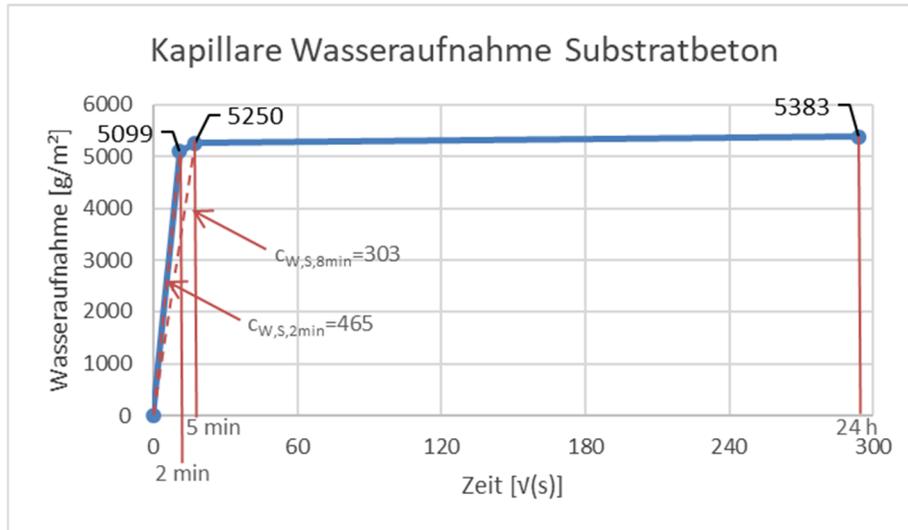


Abb. 5-8: Kapillare Wasseraufnahme Substratbeton

Da die Messung der kapillaren Wasseraufnahme des Substratbetons beinahe dieselben Werte ergibt wie die des Drainbetons, liegen auch die Werte ihre Wasseraufnahmekoeffizienten nahe aneinander. Aus Tabelle 5-5 kann am Ende des linearen Anstiegs der anfänglichen Wasseraufnahme (nach 5 Minuten) der Wert $303 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$ für den Wasseraufnahmekoeffizienten abgelesen werden. Die Differenz zwischen $303 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$ und $312 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$ (Drainbeton) kann auf Messungenauigkeit zurückgeführt werden. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der eingepresste Ton des Substratbetons keine Auswirkungen auf das Kapillare Saugen des Betons hat.

Tabelle 5-5: Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient Substratbeton

Messung nach:	2 min	5 min	24 h
$\sqrt{\text{s}}$	11	17	294
$c_{W,S}$ [g/(m ² ·√(s))]	465	303	gesättigt

Die hier angeführte Wasseraufnahme ergibt sich aus der Differenz der Masse der 24 Stunden im Wasserbad gelagerten Proben und deren Trockenmasse in Relation zur Trockenmasse (siehe Gleichung 4-4). Wie Abb. 5-9 zeigt liegen die Werte von Drain- und Substratbeton mit 7,3 % und 7,1 % sehr nahe aneinander. Der poröse UHPC nimmt mit 4,4 % Wasser kapillar auf. Am wenigsten Wasser nimmt der Normalbeton mit 3,4 % nach 24 Stunden auf.

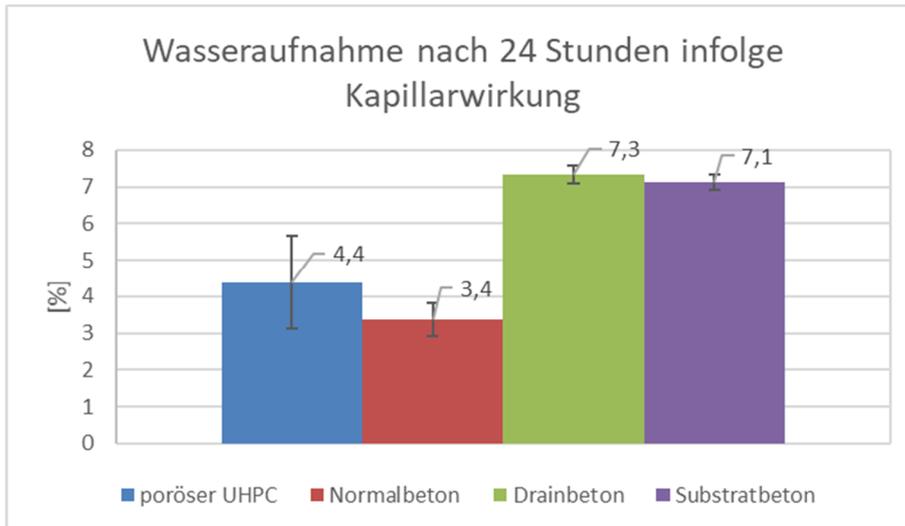


Abb. 5-9: Wasseraufnahme nach 24 Stunden infolge Kapillarwirkung von porösem UHPC, NB, DB und SB

5.3.2 Dichte, Porosität und Wasseraufnahme

Die Rohdichte ist das Verhältnis der Masse der trockenen Probe zu ihrem Rohvolumen. Das Rohvolumen errechnet sich aus den Außenabmessungen der jeweiligen Probe, inklusive aller Luftporen. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 4-5. Wie Abb. 5-10 zeigt, liegt die Rohdichte des porösen UHPC bei ca. 2275 kg/m³ und damit um ca. 75 kg/m³ unter der Rohdichte des Normalbetons. Die Rohdichte des Normalbetons von 2350 kg/m³ übertrifft die von Drain- und Substratbeton um ca. 200 kg/m³. Der Substratbeton setzt sich mit seinen 2139 kg/m³ um ca. 20 kg/m³ vom Drainbeton ab.

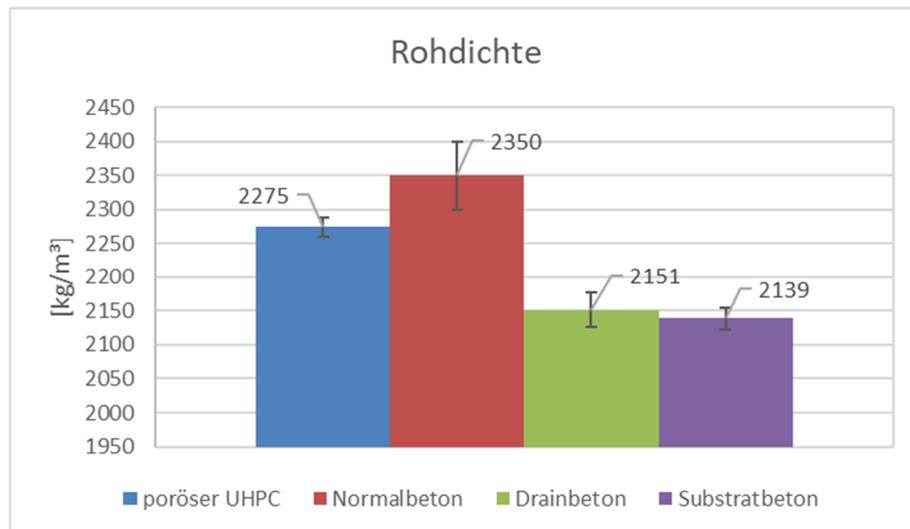


Abb. 5-10: Rohdichte von porösem UHPC, NB, DB und SB

Die Reindichte, welche mit dem Pyknometer-Verfahren bestimmt wurde (siehe 4.4), beschreibt das Verhältnis der Masse der trockenen Probe zum Volumen ihrer festen Bestandteile. Im Gegensatz zur Rohdichte berücksichtigt die Reindichte keine etwaigen Luftzwischenräume. Die Berechnung erfolgt anhand von Gleichung 4-8. Wie Abb. 5-11 zeigt, weist der poröse UHPC mit 2755 kg/m³ die größte Reindichte auf. Der Messwert des Normalbetons um ca. 9 kg/m³ unter diesem. Die Reindichte des Drainbetons liegt mit 2734 kg/m³ um 21 kg/m³ unter der des porösen UHPC-Betons. Das niedrigste Ergebnis der Messung erzielte der Substratbeton mit 2704 kg/m³. Seine Dichte ist um 30 kg/m³ kleiner als die des Drainbetons.

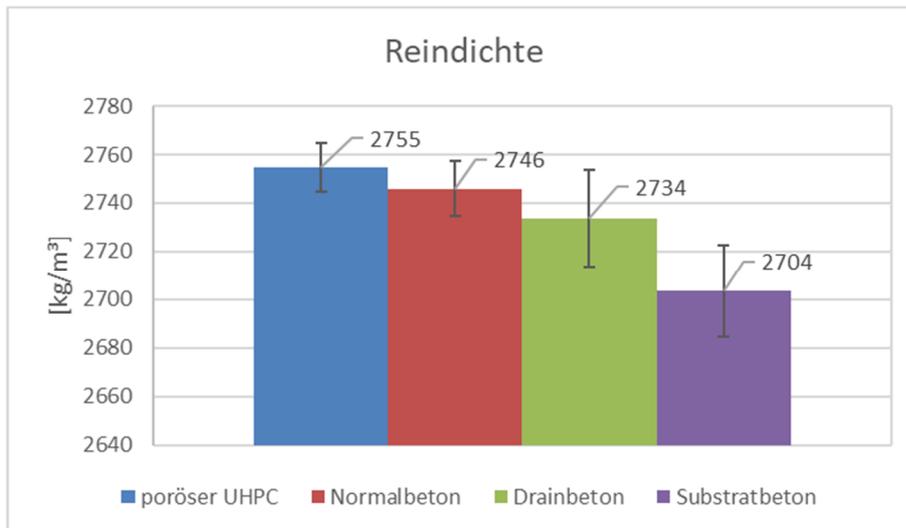


Abb. 5-11: Reindichte von porösem UHPC, NB, DB und SB

Die offene Porosität ist das prozentuelle Verhältnis der Volumina von offenen Poren zum Rohvolumen einer Probe. Die offenen Poren umschließen dabei jeglichen untereinander verbundenen Porenraum, dies umfasst durch Kapillarporen verbundene Porenräume, sowie direkt verbundene Poren wie Haufwerksporen. Die Berechnung erfolgt auf Basis von Gleichung 4-6. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abb. 5-12 dargestellt. Der poröse UHPC weist mit 15,2 % einen höheren offenen Porenanteil als der Normalbetons auf (22 % Erhöhung). Der Drain- und Substratbeton haben einen höheren offenen Porenanteil im Vergleich zum Normal- (+50 %) und porösen UHPC-Beton (+21 %). Der Porenanteil des Substratbetons liegt laut Abb. 5-12 bei 18,8 % und somit höher als der des Drainbetons (18,1 %). Durch das Einpressen von Ton in den Porenraum kann allerdings keine Erhöhung des Porenraums stattfinden.

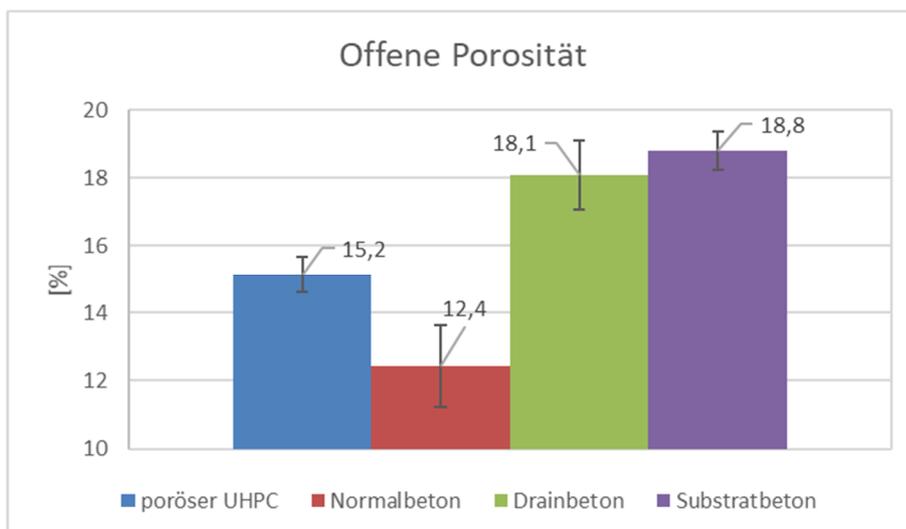


Abb. 5-12: Offene Porosität von porösem UHPC, NB, DB und SB

Ergebnisse

Um die Problematik der unplausiblen Substratbetonergebnisse genauer zu untersuchen, wurde ein weiterer Versuch gestartet. Dafür wurde bei zwei Substratbetonproben der Teil mit dem eingepressten Ton abgetrennt. Dadurch entsteht eine Probe mit Tonanteil und eine ohne. Diese wurden dann nochmals dem Verfahren nach 4.4 unterzogen. Um einen Referenzwert zum Drainbeton zu erhalten wurden auch zwei Drainbetonproben mitgeprüft (siehe Abb. 5-13)



Abb. 5-13: Wiederholte Messung von Drainbeton, Substratbeton mit und ohne Ton

Die Ergebnisse der wiederholten Messung sind in Tabelle 5-6 aufgelistet. Der Drainbeton und der Substratbeton ohne Ton erreichen dabei ähnliche Werte (Der Substratbeton ohne Ton weist eine geringfügig niedrigere Rohdichte und höhere offene Porosität auf). Der Substratbeton mit Ton hat eine erhöhte Rohdichte, niedrigere offene Porosität und gesamte Wasseraufnahme als die anderen Proben. Die unplausiblen Werte der in Abb. 5-12 dargestellten Messung ergeben sich also aus Inhomogenität des Materials und Messungenauigkeit.

Tabelle 5-6: Wiederholte Messung von Drainbeton, Substratbeton mit und ohne Ton

Probe:	Gesamte Wasseraufnahme [%]	Rohdichte [kg/m ³]	offene Porosität [%]
Drainbeton	11,35	2033	23,11
Substratbeton ohne Ton	11,89	2014	24,00
Substratbeton mit Ton	9,65	2109	20,38

Die Gesamtporosität beschreibt das prozentuelle Verhältnis der Rohdichte zur Reindichte einer Probe. Dies ist dasselbe Verhältnis, wie das des Volumens der offenen und geschlossenen Poren zum Rohvolumen der Probe. Die Gesamtporosität berücksichtigt jeglichen im Beton vorkommenden Porenraum. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 4-9. Abb. 5-14 zeigt eine Auflistung der Porosität der geprüften Betone und deren Standardabweichungen. Den niedrigsten Wert erreicht der Normalbeton mit 15,0 % Porenanteil. Der poröse UHPC, der einen hohen Anteil an feinen Haufwerksporen aufweist, erreicht einen Wert von 17,1 %. Dies entspricht einem 14 % höheren Porenanteil als der Normalbeton. Der Drain- und Substratbeton heben sich mit 21,1 %, bzw. 20,7 % Porenanteil deutlich von den Werten des porösen UHPC und Normalbeton ab. So entspricht der Porenanteil des Drainbetons 140 % des Porenanteils des Normalbeton.

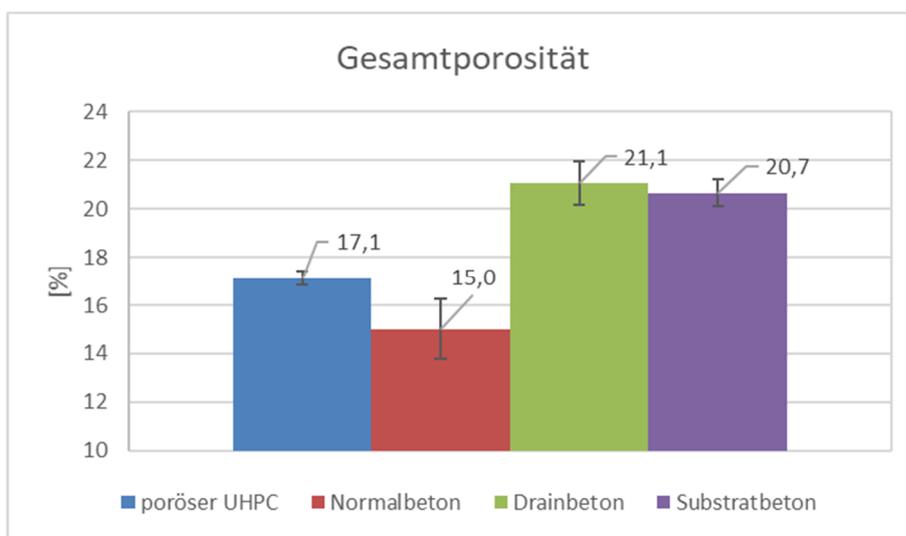


Abb. 5-14: Gesamtporosität von porösem UHPC, NB, DB und SB

Die hier angeführte gesamte Wasseraufnahme wurde parallel mit den Ergebnissen der Analyse der Porosität durchgeführt. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis der Massendifferenz der feuchten Probe und trockenen Probe zur Masse der trockenen Probe. Wie Abb. 5-15 zeigt liegt die Wasseraufnahme des porösen UHPC bei 6,7 % und damit höher als die Wasseraufnahme des Normalbetons mit 5,3 %. Dies ist auf die in diesem Kapitel dargelegte niedrigere Rohdichte, bzw. höhere Gesamtporosität des porösen UHPC-Betons zurückzuführen. Der Drainbeton nimmt 8,4 % Wasser im Verhältnis zu seiner Masse auf. Der Substratbeton nimmt mit 8,8 % etwas mehr auf. Bei der Messung der feuchten Probe verlieren sowohl Drain-, als auch Substratbeton sofort nach Herausheben der Probe aus dem Wasserbad Flüssigkeit. Der erhöhte Wasseraufnahmewert des Substratbetons kann also entweder von einer Messschwankung herrühren, oder von dem gerade beschriebenen Flüssigkeitsverlust, da der Ton der Substratbetonprobe Flüssigkeit zurückgehalten hat.

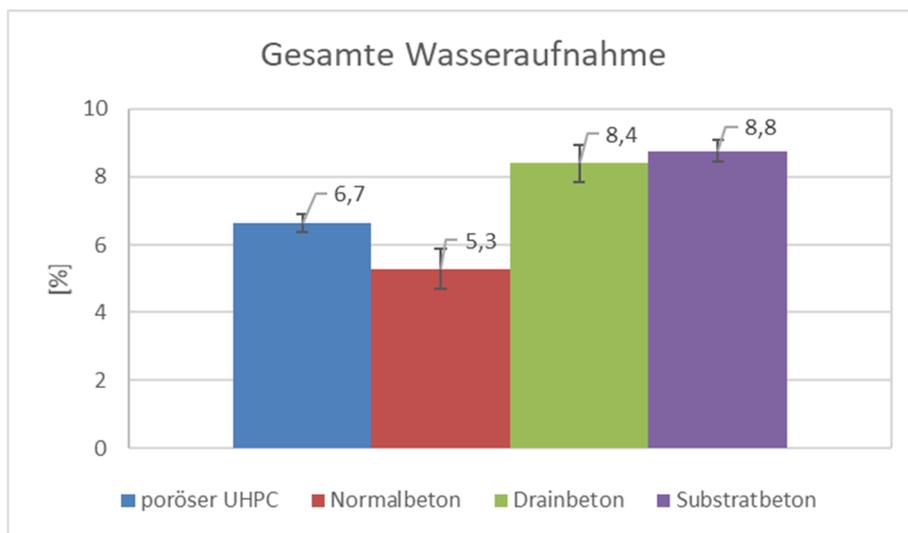


Abb. 5-15: Gesamte Wasseraufnahme von porösem UHPC, NB, DB und SB

5.3.3 Absorptionsisotherme

Die Absorptionsisotherme wurde wie in 4.5 beschrieben durch Wägung von feuchten Proben, anschließender Trocknung bis zur Massekonstanz und erneuter Wägung bestimmt. Dafür wurden Proben bei 9, 28, 50, 65 und 75 Prozent relativer Luftfeuchte gelagert. Eine Auflistung der Messergebnisse der Ausgleichsfeuchten bei diesen relativen Luftfeuchtigkeiten zeigt Tabelle 5-7 und sind in Abb. 5-16 illustriert (die Messwerte sind mit einem „x“ gekennzeichnet). Bei 9 % relativer Luftfeuchte liegt die prozentuale Wasseraufnahmen bei Normal-, Drain- und Substratbeton bei ca. 0,3-0,4 %. Einzig der poröse UHPC-Beton hebt sich mit 0,86 %, also mehr als die doppelte Massezunahme, von den restlichen Betonen ab. Die Ergebnisse der Lagerung bei 28 % relativer Luftfeuchte zeigen, dass Normal-, Drain- und Substratbeton wieder nahe beieinanderliegen. Der poröse UHPC-Beton erzielt mit seinen 2,41 % Wasseraufnahme allerdings auch bei dieser Luftfeuchte ein mehr als doppelt so großes Ergebnis wie die anderen Betone. Bei 50 % relativer Luftfeuchte zeichnet sich eine erste Veränderung zwischen der Feuchteaufnahme von Normalbeton und Drainbeton, bzw. Substratbeton ab. Der Normalbeton liegt bei einer Massezunahme von 1,85 %, Drain und Substratbeton nur bei 1,42 %. Der poröse UHPC liegt mit 3,96 % deutlich darüber.

Tabelle 5-7: Auflistung der Ausgleichsfeuchte [M.-%]

Probe:	9% rel. LF	28% rel. LF	50% rel. LF	65% rel. LF	75% rel. LF	gesättigt
Poröser UHPC	0,86	2,41	3,96	4,51	3,49	6,7
Normalbeton	0,36	0,70	1,85	2,53	1,91	5,3
Drainbeton	0,34	0,92	1,40	1,61	0,95	8,4
Substratbeton	0,32	0,88	1,42	1,68	0,93	8,8

Bei 65 % relativer Feuchte wird umso deutlicher, dass der Normalbeton mehr Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft aufnehmen kann als der Drain- und Substratbeton.

Dies ist auf das Auftreten der Kapillarkondensation ab einer relativen Luftfeuchte von >40 % zurückzuführen. Dabei wird Wasser in das Porensystem des Betons aufgrund von Kapillarkräften bei Wasserdampfdrücken unter dem Sättigungsdampfdruck eingelagert.

Es wird umso mehr aufgenommen, je kleiner der vorhandene Porenradius ist. Ab einem Porendurchmesser von >5 bis 10 Micrometer können die Porenräume auf diese Weise nicht mehr mit Wassergefüllt werden. (Hunkeler & Holtzauer, 1994)

Da der Porendurchmesser der Haufwerksporen im Drainbeton stark variiert, aber Großteiles einen Durchmesser >2 mm annimmt, kann davon ausgegangen werden, dass nur wenig Wassereinlagerung infolge Kapillarkondensation auftritt. Wie auch bei den niedrigeren Feuchtigkeitslagerungen, setzt sich der poröse UHPC auch bei 65 % relativer Luftfeuchte von den anderen Betonen mit seiner hohen Wasseraufnahme ab. Der Grund dafür ist der hohe Anteil an feinen Haufwerksporen dieses Betons.

Die Abmessungen dieser Poren ist signifikant kleiner als die der Haufwerksporen des Drainbetons, was dem porösen UHPC erlaubt durch Kapillarkräfte Wasser in das Porensystem einzulagern. Die Ergebnisse der Lagerung bei 75 % relativer Feuchte (in Abb. 5-16 strichliert) können nicht unter den Werten der Lagerung bei 65 % relativer Feuchte liegen und sind somit als ungültig anzusehen.

Für die Bestimmung der Ausgleichsfeuchte im gesättigten Bereich wurden die Ergebnisse der Gesamtwasseraufnahme (4.4) herangezogen. Die Verbindungslinien zwischen den Messpunkten basieren auf angenäherten Werten. In Abb. 5-16 rosa dargestellt ist die Sorptionskurve eines typischen Normalbetons nach Hunkeler & Holtzhauer, (1994). Es zeigt sich, dass die im Rahmen dieser Arbeit geprüften Betone deutlich von dem Standardwert abweichen.

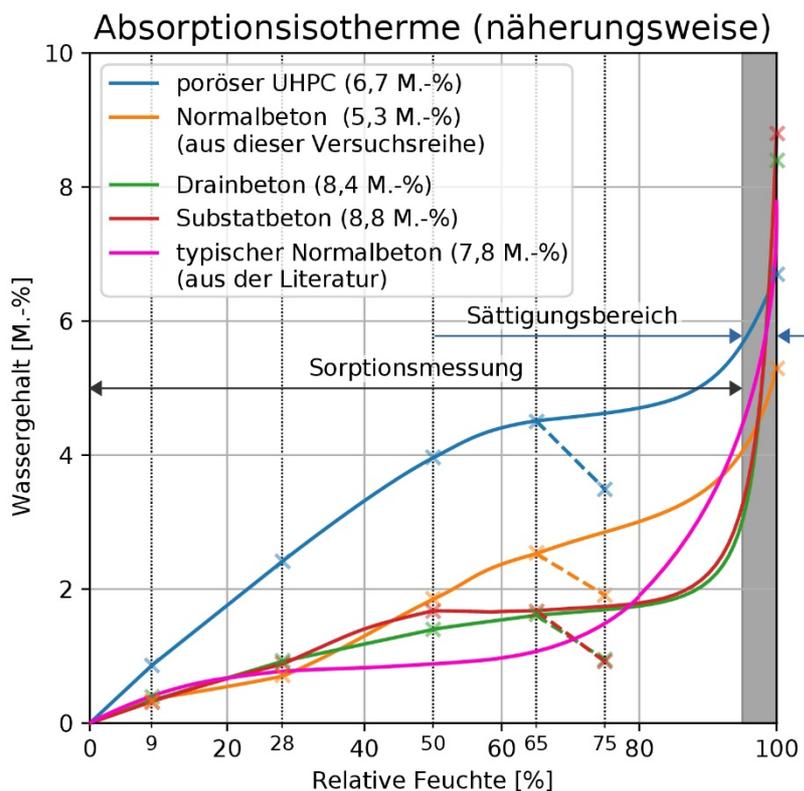


Abb. 5-16: Absorptionsisotherme (Hunkeler & Holtzhauer, 1994, mod.)

5.4 pH-Wert

Moos wächst nur oberflächlich am Beton, in Rahmen dieser Arbeit ist daher nur der oberflächliche pH-Wert relevant. Bei der pH-Messung über den Querschnitt wird einerseits der pH-Wert am Rand der Probe (Oberfläche), andererseits die Distanz zum unkarbonatisierten Bereich im Beton betrachtet. Die pH-Diffusionsprüfung befasst sich direkt dem Oberflächen-pH-Wert des Betons.

5.4.1 pH Messung über den Querschnitt

Für die optische pH Messung über den Querschnitt wurden am Tag der zweiten Auslagerung (05.06.2018) von jeder Betonvariation, die beschleunigt karbonatisiert wurde eine Probe in einem mit Stickstoff gefüllten Gefäß gelagert (die poröse UHPC Probe wurde schon am ersten Tag der Auslagerung stickstoffgelagert 03.05.2018). Diese wurden am Tag der Messung (07.08.2018) aus der Stickstoffumgebung entfernt, zugeschnitten und geprüft. Ihr pH-Wert zum Zeitpunkt der Messung entsprach also etwa dem der Betonplatten am Auslagerungsdatum. Die dargestellten Messungen sind nach 18 Sekunden entstanden. Die pH-Skala ist im mittleren Teil der Abbildungen dargestellt und die Einheit der Abmessungen beträgt Millimeter.

Die Analyse des porösen UHPC-Betons ist in Abb. 5-17 dargestellt. Es ist anzumerken, dass die mit Indikatorfarbstoff benetzte Polyethylenterephthalat-Folie beim Auflegen auf die Probe leicht nach rechts gerutscht ist. Dies erzeugt im rechten Teil des Bildes der optischen Bildanalyse den „Schatten“, der laut Indikator einen pH-Wert von ca. 8,8 aufweist. Dieser Teil der Messung ist nicht in direkten Kontakt mit dem Beton und ist daher für die Analyse nicht relevant. Relevante Ergebnisse sind im linken oberen Rand abzulesen, wo der pH-Wert in den äußeren Zehntelmmillimeter von über 12,0 auf einen Wert unter 7,2 abfällt. Die Distanz von der Oberfläche bis zum unkarbonatisierten Tiefe des Betons liegt zwischen 0,42 und 0,63 Millimeter.

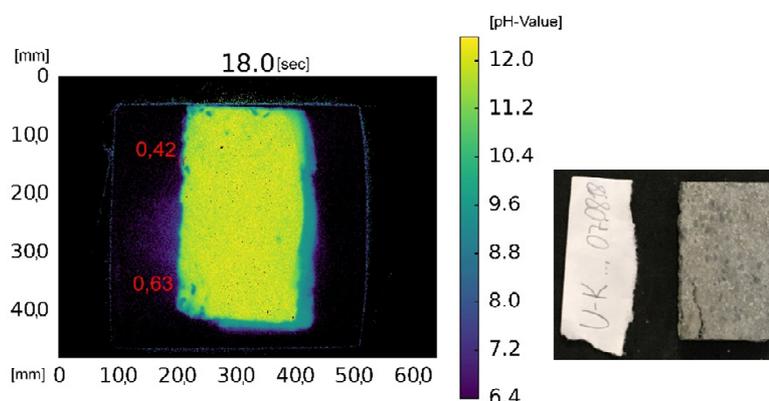


Abb. 5-17: Poröser UHPC: optische Bildanalyse (links) und Probe (rechts)

Ergebnisse

Die Probe des Normalbetons entstand aus einem Teilstück einer Normalbetonplatte (siehe Abb. 5-18). Dieses Teilstück wurde nach der Plattenkonditionierung von der Platte ausgeschnitten. Das bedeutet, dass die im Bild rechte Seite des Betons nicht CO₂ behandelt wurde. Diese Seite erfuhr ab dem Zeitpunkt des Zerschneidens (zwei Tage nach Ende der Konditionierung: 07.06.2018) bis zur optischen Oberflächen-pH-Wertmessung (08.08.2018) nur natürliche Karbonatisierung.



Abb. 5-18: Ausgangstück Normalbetonprobe

Die Differenz der Karbonatisierungstiefe der konditionierten Flächen zur geschnittenen ist in Abb. 5-19 deutlich zu erkennen. Die im Bild unten dargestellte, karbonatisierte Zone der nachträglich geschnittenen Seite ist im Gegensatz zu den anderen Seiten des Betons nur wenige Zehntelmillimeter tief. Dabei ist anzumerken, dass der Indikatorfarbstoff auf der linken Seite der optischen Bildanalyse verwaschen und daher nicht relevant ist. An der oberen Seite der Normalbetonprobe beträgt die Distanz der Oberfläche bis zu unkarbonatisierten Teil des Betons etwa 3,8 mm, auf der rechten Seite steigert sich diese Tiefe von 4,9 bis auf ca. 9,5 mm. Wie im rechten und unteren Teil der Bildanalyse in Abb. 5-19 zu erkennen ist, nähert sich der Randbereich des Betons sowohl im konditionierten, als auch im natürlich konditionierten Bereich einem pH-Wert von unter 7,2 an.

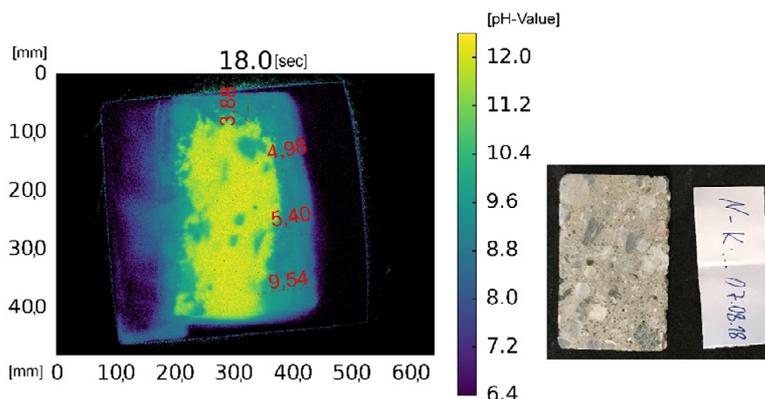


Abb. 5-19: Normalbeton: optische Bildanalyse (links) und Probe (rechts)

Um die optische Oberflächen-pH-Wertmessung durchführen zu können, darf der fluoreszierender Indikatorfarbstoff nicht vor der Bildaufnahme austrocknen. Da

genau dies der Fall bei Drain und Substratbeton war, wurde die Polyethylenterephthalat-Folie mehrfach benetzt, bis eine optisch auswertbare Aufnahme der Proben möglich war.

Dies führte dazu, dass wie Abb. 5-20 zeigt bei der Messung des Drainbetons der Indikatorfarbstoff bereits mit dem Beton in Verbindung kam und über die Folie verlief (links im Bild). Zudem führte das haufwerksporige Gefüge des Drainbetons dazu, dass kein durchgehender Kontakt mit dem Querschnitt der Probe hergestellt werden und somit die Tiefe der unkarbonatisierten Zone im Beton nicht eindeutig bestimmt werden konnte. Dennoch zeigt sich im Randbereich ein Abfall des pH-Werts auf einen Wert unter 7,2.

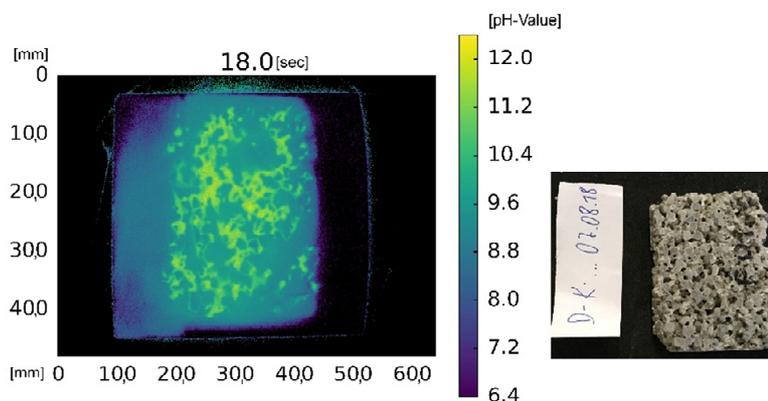


Abb. 5-20: Drainbeton: optische Bildanalyse (links) und Probe (rechts)

Bei der Messung am Substratbeton konnte ein eindeutigeres Ergebnis als beim Drainbeton erzielt werden. Dennoch führte die wiederholte Benetzung der Polyethylenterephthalat-Folie dazu, dass der obere Teil der Messung verschwommen ist (siehe Abb. 5-21). An allen anderen Seiten der Probe stellt sich eine Distanz von 9,9 bis 11,7 von der Oberfläche des Betons bis zum unkarbonatisierten Teil des Betons ein. Im Randbereich der Messung fällt pH-Wert des Betons auf unter 7,2 ab.

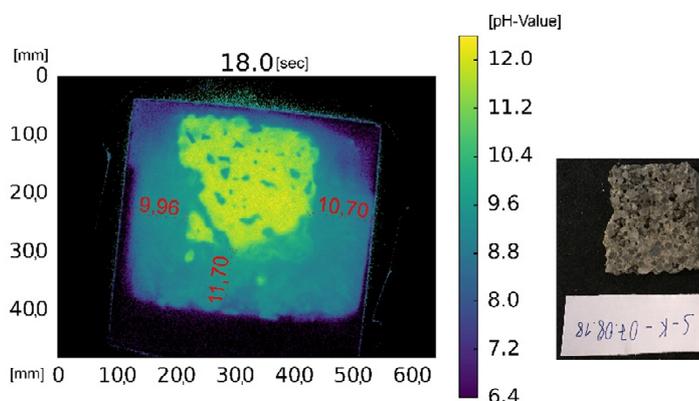


Abb. 5-21: Substratbeton: optische Bildanalyse (links) und Probe (rechts)

Ergebnisse

Abb. 5-22 zeigt die mit der optische pH Messung über den Querschnitt an den betonen gemessen wurden. Es zeigt sich, dass die der poröse UHPC, der kürzer als der karbonatisierte Normalbeton und der Substratbeton beschleunigt karbonatisiert wurde (siehe 3.4), im Vergleich eine signifikant kleinere Karbonatisierungstiefe aufweist.

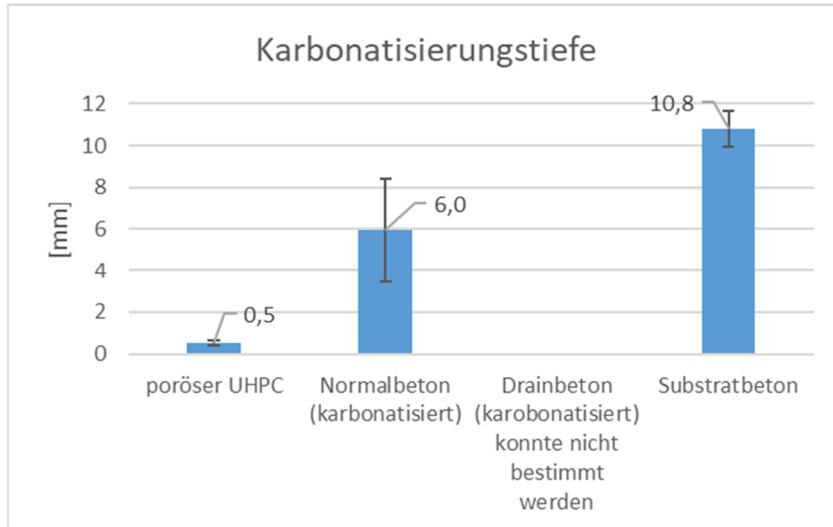


Abb. 5-22: Karbonatisierungstiefe von porösem UHPC, NB, DB und SB

5.4.2 pH Diffusionsprüfung

Der erste Teil der pH-Diffusionsprüfung basiert auf einer sechstägigen Lagerung der Betonproben in destilliertem Wasser. Es wird kontinuierlich der pH-Wert des Wassers gemessen. Zudem wird nach dem zweiten, vierten und sechsten Tag der Lagerung eine der Betonproben mit einer Indikatorlösung geprüft.

Bei der kontinuierlichen pH-Messung des destillierten Wassers ist eine rapide Änderung des pH-Werts festzustellen (siehe Abb. 5-23). Dabei steigt der pH-Wert des Wassers von ca. 6,6 innerhalb von drei Stunden beim porösen UHPC auf 10,2, beim Normalbeton auf 9,3, beim Drainbeton auf 9,9 und beim Substratbeton auf 9,6 an. Ursache dafür ist der hohe Potentialunterschied des destillierten Wassers zum Porenwasser des Betons. Dadurch diffundiert unter anderem Kalzium (Ca^{2+}) in das Wasser und senkt den pH-Wert. Nach den sechs Tagen der Messungen stellt sich bei einem pH-Wert von ca. 8,3 ein Gleichgewicht zwischen der äußeren Betonschicht der Proben und den Wässern ein. (Ekström, 2001)

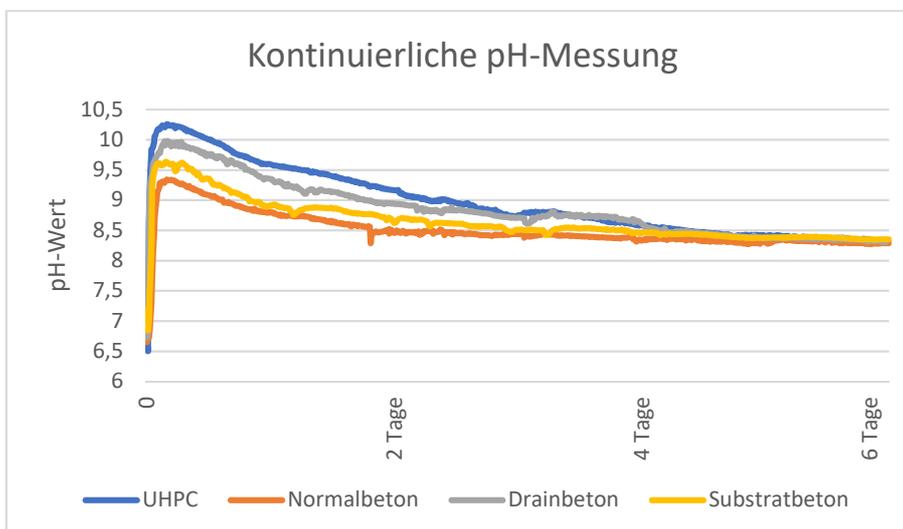


Abb. 5-23: Kontinuierliche pH-Messung des Lagerungswassers von porösem UHPC, NB, DB und SB

In zweitägigen Intervallen nach Start der Lagerung in destilliertem Wasser wurde pro Beton eine Probe aus dem Wasserbad entfernt und mit einer Methylrotindikatorlösung beträufelt. Wie in Abb. 5-24 zu erkennen ist, ist sowohl nach 2, 4 und 6 Tagen Lagerung in destillierten Wasser an der Oberfläche eine rötliche Verfärbung auf der Oberfläche des porösen UHPC zu erkennen (d.h. $\text{pH} < 6$). Es kann daher keine Aussage zu einer Veränderung des Oberflächen pH-Werts getroffen



werden.

Ergebnisse

Abb. 5-24: Poröser UHPC mit Indikatorlösung: 2 Tage links, 4 Tage Mitte, 6 Tage rechts

Gleich der Methylrotindikatormessung am porösen UHPC zeigten auch die Messungen am Normalbeton (Abb. 5-25), Drainbeton (Abb. 5-26) und Substratbeton (Abb. 5-27) keine eindeutige Änderung der Verfärbung an der Oberfläche. Vergleicht man die Fotos dieser Messung jedoch mit jenen der im zweiten Teil der Diffusionsprüfung durchgeführten Indikatormessungen, so zeigt sich ein deutlicher Farbunterschied (siehe Abb. 5-28, Abb. 5-29, Abb. 5-30 und Abb. 5-31).



Abb. 5-25: Normalbeton mit Indikatorlösung: 2 Tage links, 4 Tage Mitte, 6 Tage rechts



Abb. 5-26: Drainbeton mit Indikatorlösung: 2 Tage links, 4 Tage Mitte, 6 Tage rechts

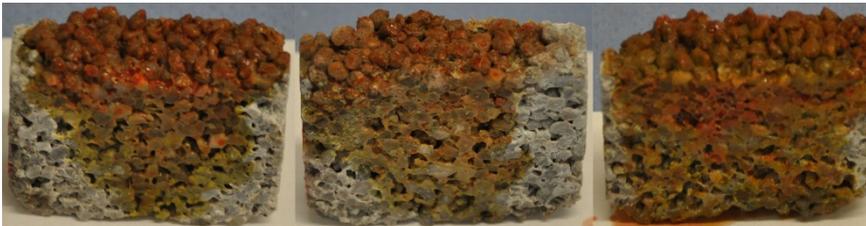


Abb. 5-27: Substratbeton mit Indikatorlösung: 2 Tage links, 4 Tage Mitte, 6 Tage rechts

Beim zweiten Teil der pH-Diffusionsprüfung wurden weitere Proben 14 Tage lang in einem geschlossenen Behälter in 5 mm destilliertem Wasser gelagert. Danach wurden die Proben aus dem Behälter entfernt und die im Wasser eingetauchte Oberfläche mit einer pH-Elektrode gemessen. Die Ergebnisse dieser Messung liegen bei allen Betonen bei pH 8,0 - 8,2 (siehe Tabelle 5-8).

Tabelle 5-8: Messung mit pH-Sonde

Probe:	pH			Durchschnitt
Poröser UHPC	8,5	7,8	8,2	8,2
Normalbeton	8,2	7,8	8,0	8,0
Drainbeton	8,1	8,3	8,2	8,2
Substratbeton	7,8	8,3	8,4	8,2

Nach der Messung mit der pH-Elektrode wurden die Proben mit Methylrot beträufelt. Wie Abb. 5-28 zeigt, ist nach der 14-tägigen Lagerung keine rote Verfärbung am porösen UHPC mehr zu erkennen. Der Oberflächen-pH-Wert ist somit niedriger als 6.



Abb. 5-28: Poröser UHPC mit Indikatorlösung nach 14 Tagen Wasserlagerung

Beim Normalbeton ist an den Spitzen der rauen Oberfläche eine deutliche rote Verfärbung wahrzunehmen (siehe Abb. 5-29). An den tieferen Stellen der Oberfläche ist entweder keine Verfärbung wahrzunehmen, oder es zeichnet sich ein Gelbton ab. An diesen Stellen liegt der pH-Wert bei größer als 6.



Abb. 5-29: Normalbeton mit Indikatorlösung mit Indikatorlösung nach 14 Tagen Wasserlagerung

Ergebnisse

Die mit Methylrot beträufelten Drainbetonproben verfärben sich nicht mehr rot. Bis auf vereinzelte Stellen ist die betrachtete Oberfläche entweder gelb, oder nicht verfärbt und daher basischer als pH 6 (siehe Abb. 5-30).



Abb. 5-30: Drainbeton mit Indikatorlösung nach 14 Tagen Wasserlagerung

Die betrachteten Substratbetonproben sind an den äußersten Punkten der Erhöhungen ihrer Oberfläche rot verfärbt (siehe Abb. 5-31). Die tieferen Stellen der Oberfläche weisen eine deutliche gelbe Farbe und somit einen pH-Wert basischer als 6 auf.



Abb. 5-31: Substratbeton mit Indikatorlösung nach 14 Tagen Wasserlagerung

Nur die Oberfläche des Betons liegt in einem pH-neutralen, bzw. leicht saurem Bereich. Die Vertiefungen des Drain- und Substratbeton, sowie das Innere aller anderen Proben ist basisch. Bei Wasserlagerung über einen längeren Zeitraum (mehrere Tage) dringt der basische pH-Bereich an die Oberfläche.

5.5 Messungen am Auslagerungsversuch

In diesem Kapitel werden die anhand der sonnigen und schattigen Auslagerung gemessenen Faktoren aufgelistet und beschrieben.

5.5.1 Sonnige Lagerung

5.5.1.1 Standortfaktoren

Bei der sonnigen Lagerung waren die Proben dem Klima beim Botanischen Garten der Universität Graz direkt ausgesetzt. Die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit auf dem Dach, also dem Ort der Auslagerung, wurden mit einem Datenlogger, der unmittelbar neben den Betonplatten platziert wurde, aufgezeichnet und in Abb. 5-32 illustriert. Die ersten drei Probenaufnahmen (20.06.2018, 05.07.2018 und 24.07.2018) wurden mit gelben Linien markiert. Die Aufzeichnung stoppte knapp ein Monat vor der letzten Probenaufnahme am 05.10.2018, die Messwerte sind dennoch sehr aussagekräftig. So unterschreitet die Höchsttemperatur des Tages (von 06:00 bis 20:00) nur an 33 von 118 Messtagen die 40 Grad Celsius Marke. Die durchschnittliche Tageshöchsttemperatur über die Messdauer liegt bei 43 Grad Celsius. Konträr zum Steigen der Temperatur, fällt die relative Luftfeuchte ab. Die mittlere, relative Luftfeuchte unter Tags fällt am 19.07.2018 auf den kleinsten Wert der Messung von 31 % ab. Im Schnitt herrscht auf dem Dach unter Tags eine relative Luftfeuchte von 65 %. Der Tagesmindestwert der Temperatur liegt im Mittel bei 14°C und fällt am 27.08.2018 auf den Mindestwert der Messung von 4,5°C ab.

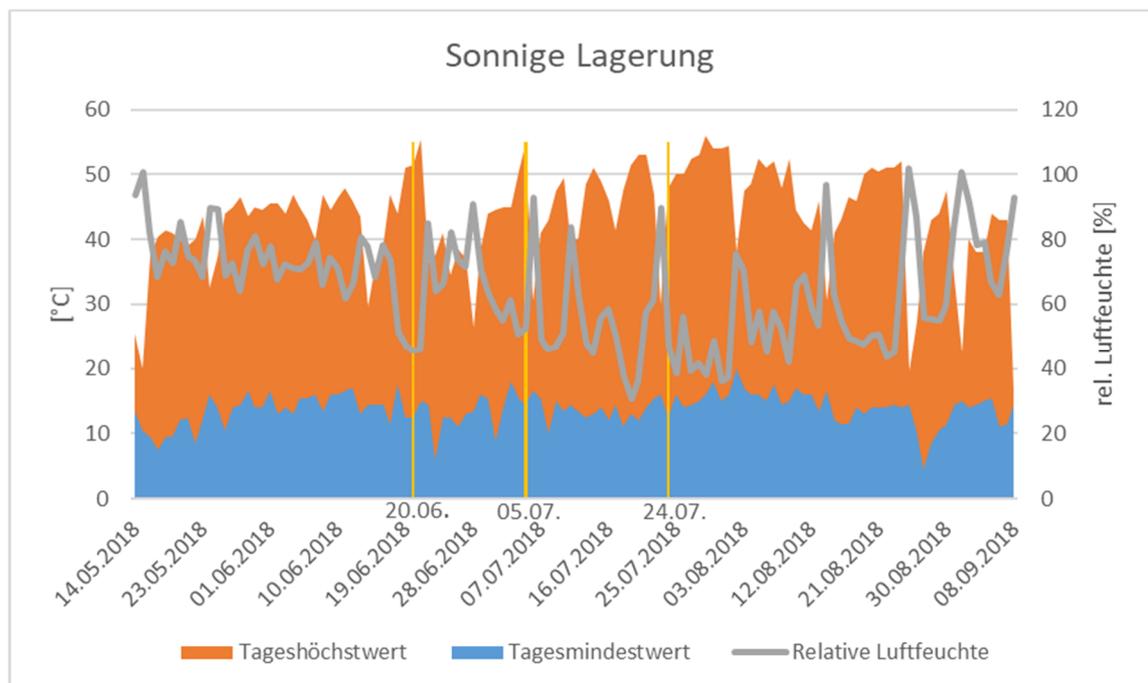


Abb. 5-32: Temperatur und relative Luftfeuchte der sonnigen Lagerung

Die direkte Sonneneinstrahlung wurde nicht gemessen, allerdings sind die auftretenden, hohen Temperaturen ein Indiz dafür, dass die Dachfläche zusätzlich von Sonneneinstrahlung aufgeheizt wurde. Tabelle 5-9 listet eine Übersicht der gemessenen Standortfaktoren auf. Es zeigt sich, dass sowohl die Umgebungstemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit einer starken Schwankung unterliegen.

Tabelle 5-9: Standortfaktoren sonnige Lagerung

Bezeichnung	Methode	Kenngroße	Einheit	Messung	Fazit
Temperaturzahl	Datenlogger	Umgebungstemperatur	°C	4,5-56	Die hohen auftretenden Temperaturen sind schädlich für nicht getrocknetes Moos.
Lichtzahl		Sonnenintensität	Wh/m ²		Wurde nicht gemessen. Hat aber direkten Einfluss auf die Temperatur.
Feuchtezahl	Datenlogger	Relative Luftfeuchte	%	31-101	Moose nehmen Wasser über ihre Oberfläche aus der Luft auf. Niedrige Luftfeuchtigkeit bedeutet keine Stoffwechselaktivität.

5.5.1.2 Betonfeuchtigkeit

Tabelle 5-10 beinhaltet die Messergebnisse der Betonfeuchtheitsmessung (siehe 4.10) an den Auslagerungsmessterminen. Es wurde zusätzlich die Tageshöchsttemperatur, Tagesmindesttemperatur und relative Luftfeuchte an den jeweiligen Messtagen angeführt. Die gemessenen, durchschnittlichen Betonfeuchten an Ober- und Unterseite der Betonproben liegen beim porösen UHPC im Vergleich zu den anderen Betonen nahe aneinander, er war also kapillar durchfeuchtet. Anzumerken ist, dass die dichteren Betone (poröser UHPC und Normalbeton) in der Regel eine höhere Betonfeuchtigkeit an der Oberseite aufweisen, als der Drainbeton. Der Substratbeton erreicht auch höhere Werte als dieser, was auf eine höhere Wasserleitfähigkeit des eingepressten Tons und somit auf einen höheren Feuchtigkeitsanteil zurückzuführen ist.

Tabelle 5-10: Betonfeuchtigkeit sonnige Lagerung

		20.06.2018	05.07.2018	24.07.2018	05.10.2018	Mittelwert
Maximaltemperatur [°C]		51,5	54,5	48		
Mindesttemperatur [°C]		12,5	14,5	12,5		
Relative Luftfeuchte [%]		46	53	47		
Poröser UHPC	Oberseite	2,8%	3,0%	3,1%	3,2%	3,0
	Unterseite		4,4%	4,1%	4,3%	4,3
Normalbeton	Oberseite	1,8%	2,2%	2,5%	2,3%	2,2
	Unterseite		4,8%	5,4%	4,8%	5,0

Drainbeton	Oberseite	0,2%	0,3%	2,3%	0,8%	0,9
	Unterseite		2,8%	4,0%	2,9%	3,2
Substratbeton	Oberseite	1,1%	1,5%	3,4%	1,7%	1,9
	Unterseite		3,2%	4,2%	2,9%	3,4

5.5.1.3 Mooszuwachs und Mooswachstum

Bei der Probenaufnahme am 05.10.2018 sind auf den porösen UHPC- und Normalbetonplatten keine Spuren von Moosen mehr aufzufinden. So zeigt Abb. 5-33 eine der porösen UHPC-Platten zum Vergleich am 06.06.2018 und 05.10.2018.



Abb. 5-33: UHPC_{so}-2-K (links: 06.06.2018, rechts: 05.10.2018)

Auf Substrat- und karbonatisierten Drainbeton sind kleine Reste von Moosen vorzufinden. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass die zu hohe Agar-Agar Konzentration beim Aufbringen des Moores ein Verankern der Moose auf der Betonoberfläche ein Verankern mit Rhizoiden verhinderte.

Auf den „unkarbonatisierten“ Drainbetonplatten sind zum Aufnahmezeitpunkt noch Spuren von Moosen vorhanden (siehe Abb. 5-34, rechts). Allerdings ist am 05.10.2018 nicht klar, ob diese abgestorben sind, da diese infolge der niedrigen Oberflächenfeuchtigkeit des Betons ausgetrocknet und in einen scheinbaren Zustand übergegangen sein könnten.



Abb. 5-34: D₅₀-3 (links: 06.06.2018, rechts: 05.10.2018)

Bei erneuter Betrachtung der Proben in sonniger Lagerung am 30.04.2019 zeigte sich, dass tatsächlich Moos wieder stoffwechselaktiv ist (siehe Abb. 5-35). Hauptsächlich *Schistidium crassipilum*, aber auch *Orthotrichum anomalum* haben die hohen Temperaturen überstanden und treiben neu aus.



Abb. 5-35: D₅₀-3 am 30.04.2019

5.5.2 Schattige Lagerung

5.5.2.1 Standortfaktoren

Die Proben der schattigen Lagerung sind hinter dem Gebäude des Instituts für Biologie der Universität Graz situiert und von einem Baum beschattet. Sie sind also dem Makroklima nicht direkt ausgesetzt. Die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit wurden über die Messdauer (14.05.2018 bis 08.09.2018 von 06:00 bis 20:00) von einem unmittelbar neben den Betonplatten platzierten Datenlogger aufgezeichnet. Während der 118 tage langen Temperaturmessung (siehe Abb. 5-36) liegt diese nur an 17 Tagen über 30°C. Die mittlere Tagesmindesttemperatur liegt bei 15°C. Die relative Luftfeuchte liegt im Mittel bei 90 % und fällt während der Messdauer nur an 4 Tagen unter 70 %.

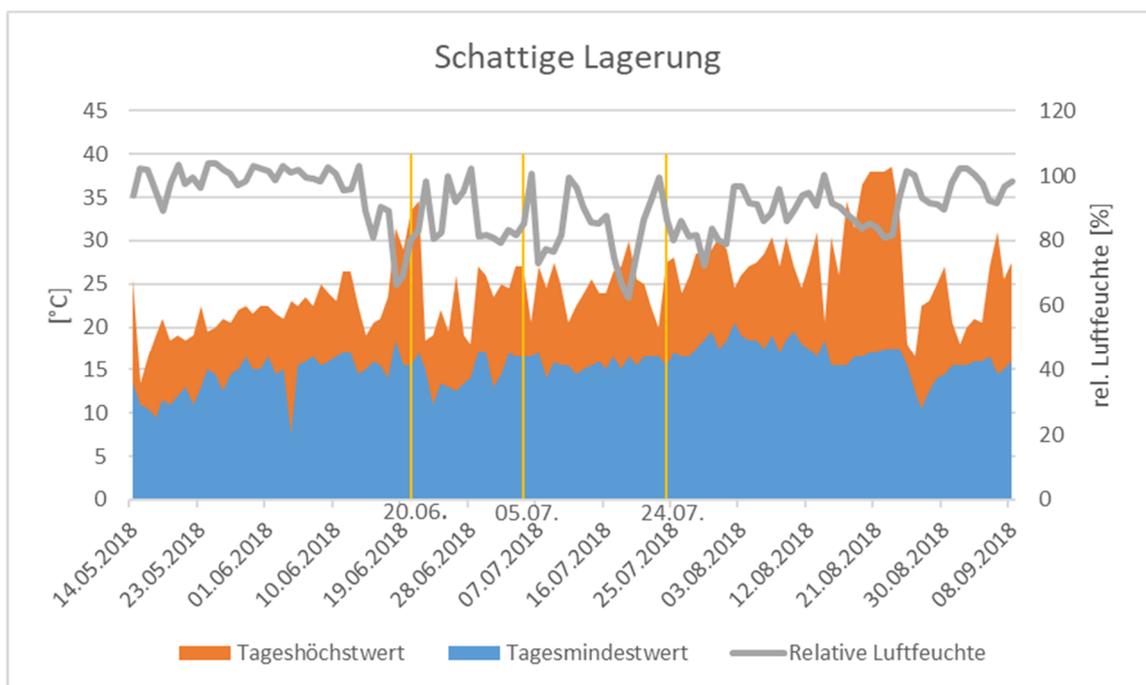


Abb. 5-36: Temperatur und relative Luftfeuchte der schattigen Lagerung

Tabelle 5-11 zeigt eine Übersicht der gemessenen Standortfaktoren.

Tabelle 5-11: Standortfaktoren schattige Lagerung

Bezeichnung	Methode	KenngroÙe	Einheit	Messung	Fazit
Temperaturzahl	Datenlogger	Umgebungstemperatur	°C	7,5-38,5	Gemäßigte Temperaturen erlauben dem Moos stoffwechselaktiv zu sein.
Lichtzahl		Sonnenintensität	Wh/m ²		Wurde nicht gemessen. Hat aber direkten Einfluss auf die Temperatur.
Feuchtezahl	Datenlogger	Relative Luftfeuchte	%	62-103	Hohe Luftfeuchtigkeit erlaubt dem poikilohydrischen Moos Wasser über seine Oberfläche aufzunehmen.

5.5.2.2 Betonfeuchtigkeit

Die an den in Abb. 5-36 als gelbe Linien dargestellten Messterminen (20.06.2018, 05.07.2018 und 24.07.2018) gemessenen Bodenfeuchten an Ober- und Unterseite der Betonproben sind in Tabelle 5-12 aufgelistet. Wie auch bei der sonstigen Lagerung zeigt sich auch bei der schattigen Lagerung, dass der poröse UHPC an Ober- und Unterseite im Vergleich zu den anderen Betonen nahe aneinanderliegende Werte annimmt, er war also kapillar durchfeuchtet. Außerdem erreicht er an jedem Messtermin den höchsten Messwert an der Oberseite. Der Normalbeton weist an allen Messtagen die höchste Betonfeuchtigkeit an der Unterseite auf. Hinsichtlich Ihrer Betonfeuchte verhalten sich Drain- und Substratbeton bei der schattigen Lagerung sehr ähnlich und nehmen nahe aneinanderliegende Werte an.

Tabelle 5-12: Betonfeuchtigkeit schattige Lagerung

		20.06.2018	05.07.2018	24.07.2018	05.10.2018	Mittelwert
Maximaltemperatur [°C]		33,5	27	27,5		
Mindesttemperatur [°C]		15,5	16,5	15,5		
Relative Luftfeuchte [%]		80	85	87		
Poröser UHPC	Oberseite	2,7%	2,8%	3,6%	3,0%	3,1%
	Unterseite		4,0%	4,9%	4,2%	4,4
Normalbeton	Oberseite	2,1%	2,4%	3,7%	2,4%	2,6
	Unterseite		4,9%	5,5%	5,4%	5,2
Drainbeton	Oberseite	1,3%	1,7%	4,1%	1,4%	2,1
	Unterseite		3,2%	4,2%	3,7%	3,7
Substratbeton	Oberseite	1,4%	2,2%	4,4%	1,9%	2,5
	Unterseite		2,8%	4,0%	3,4%	3,4

5.5.2.3 Mooszuwachs und Mooswachstum

Am Tag der letzten Probenaufnahme, dem 05.10.2018, ist auf keiner der Probeplatten *Rhynchostegium murale* vorzufinden. *Amblystegium serpens*, *Hypnum cupressiforme* und *Brachythecium rutabulum* sind die überlebenden Arten auf den Betonen. Bei der zweiten Auslagerung am 05.06.2018 wurde eine zu hoch konzentrierte Agar-Agar Mischung verwendet. Dies führte dazu, dass das Moos sich nicht auf den Platten, sondern auf der Agar-Agar Schicht verankerte und diese Schicht sich von dem Beton löste. Dies betrifft explizit die Platten mit dem Index N_{SCH}-1-K, N_{SCH}-2-K und S_{SCH}-4-K. Diese Betonplatten wurden bei der Flächenanalyse nicht berücksichtigt. Abb. 5-37 illustriert den Vergleich Mooszuwachses aller Moosarten auf den Betonproben vom Tag der ersten Probenaufnahme am 06.06.2018, zur gesamten Moosfläche am 05.10.2018. Dabei schneidet der poröse UHPC mit 39 % Mooszuwachs am schlechtesten ab. Die Mittelwerte der karbonatisierten, der „unkarbonatisierten“ und der frisch gebrochenen Normalbetonplatten liegen sehr nahe beieinander und sind gemittelt bei ca. 46 % („Unkarbonatisiert“ steht hier für natürliche Karbonatisierung, also Karbonatisierung infolge von Kontakt des Betons mit Umgebungsluft.). Auf dem karbonatisierten Drainbeton, karbonatisierten Normalbeton und Substratbeton ist Moosbewuchs messbar. Die Ergebnisse der Messungen sind allerdings durch die zu hohe Konzentration an Agar-Agar beim Auslagern verfälscht, kaum repräsentativ und daher hier als ungültig gekennzeichnet (in Abb. 5-37 strichliert).

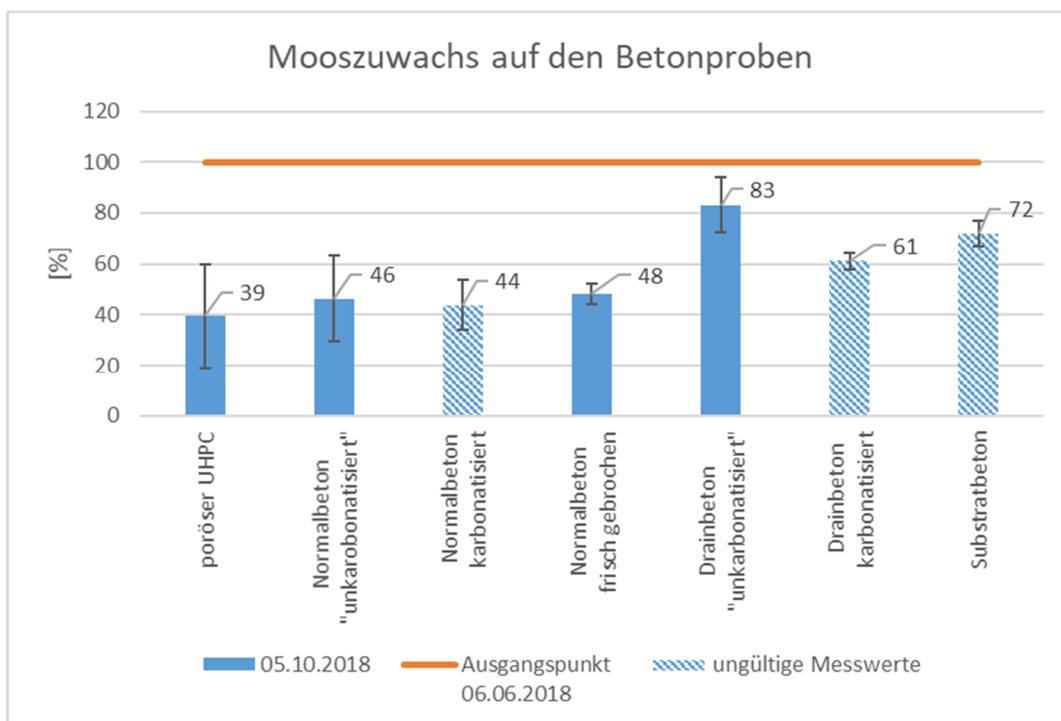


Abb. 5-37: Mooszuwachs auf den Betonproben am 05.10.2018

Am 15.05.2019 wurde nochmals eine Gesamtflächenberechnung an den schattigen Proben durchgeführt. Abb. 5-38 zeigt, dass sowohl am porösen UHPC als

auch am „unkarbonatisierten“ Drainbeton Mooszuwachs erkennbar ist. Die Moose am „unkarbonatisierten“ Normalbeton gingen leicht zurück. Mooszuwachs auf dem karbonatisierten Normalbeton (strichliert) nahm stark ab. Am frisch gebrochenen Normalbeton nahm der Mooszuwachs nochmals um 17 % ab. Auf den ungültigen Betonproben, wegen zu hoher Agar-Agar Konzentration des Drainbetons (karbonatisiert) und des Substratbetons kann Mooszuwachs verzeichnet werden. Eine mögliche Erklärung dieses Zusammenhangs ist die grobe Haufwerksporigkeit und in weiterer Folge hohe Oberflächenrauigkeit von Drain- und Substratbeton, durch welche sich die Agar-Agar-Schicht entweder auflösen und in die Porenräume abfließen konnte oder sich oberflächlich am Beton hält und in weiterer Folge auch das Moos. Es ist also ein genereller Mooszuwachs auf allen Betonen, außer am Normalbeton zu verzeichnen. Abb. 5-39 zeigt eine Gegenüberstellung der „unkarbonatisierten“ Drainbetonplatte mit dem Index 1 am jeweiligen Auswertungsdatum.

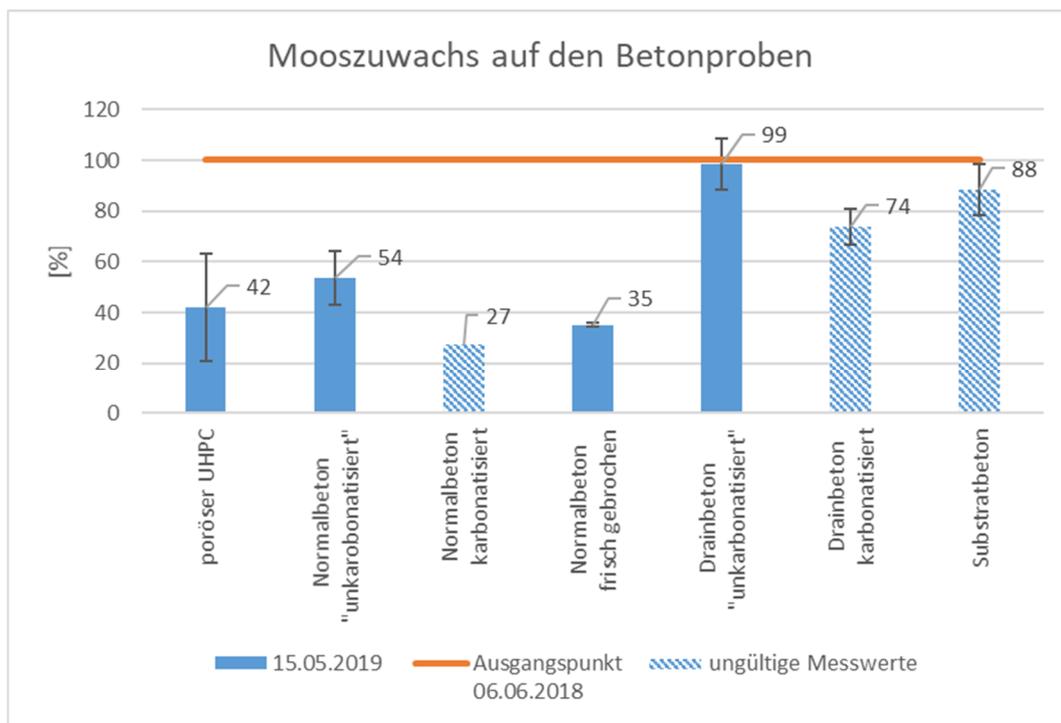


Abb. 5-38: Mooszuwachs auf den Betonproben 15.05.2019



Abb. 5-39: D_{SCH}-1: links: 06.06.2018, Mitte: 05.10.2018, rechts: 15.05.2018

Zusätzlich zur Analyse der Gesamtfläche des Moores, wurden die Einzelflächen der jeweiligen, überlebenden Moosart vom 05.10.2018 mit der Einzelfläche der Moosart vom 06.06.2018 verglichen. Dafür wurden Moosflächen, die am 05.10.2018 nicht mehr auffindbar waren, nicht in die Messung der Flächen vom 06.06.2018 aufgenommen. In den nachfolgenden Abbildungen wird *Amblystegium serpens* als „AS“, *Hypnum cupressiforme* als „HC“ und *Brachythecium rutabulum* als „BR“ abgekürzt.

Sowohl das betrachtete *Amblystegium serpens* als auch *Hypnum cupressiforme* erfuhren während der Auslagerung im Schnitt einen Zuwachs am porösen UHPC (siehe Abb. 5-41). Dabei ist anzumerken, dass die Streuung der Messwerte bei *Amblystegium serpens* von 76 % bis 152 % der ursprünglichen Moosfläche variiert. Bei *Hypnum cupressiforme* liegt die Variation der Ergebnisse zwischen 87 % und 135 %. Nur auf einer porösen UHPC-Platte war *Brachythecium rutabulum* festzustellen und wies 70 % seiner Fläche vom 06.06.2018 auf.

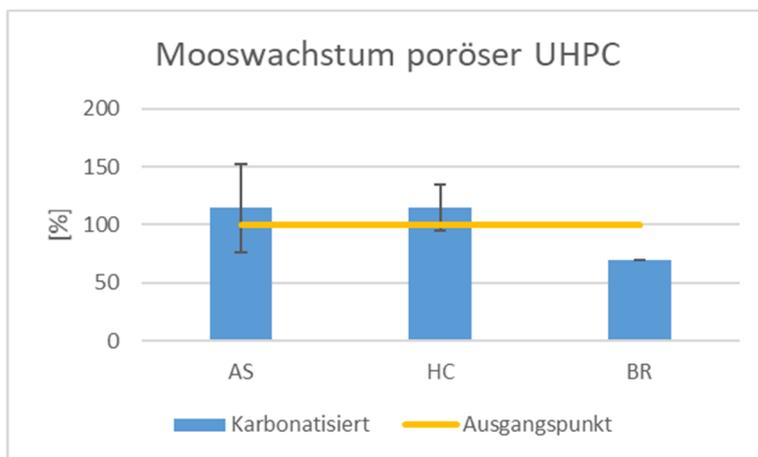


Abb. 5-40: Mooswachstum von AS, HC und BR am porösen UHPC

Das prozentuelle Mooswachstum der einzelnen Moosarten ist in Abb. 5-42, bezogen auf die verschieden vorbehandelten Oberflächen des Normalbetons, aufgelistet. Das gemessene *Amblystegium serpens*-Moos ging auf allen drei Normalbetonoberflächen um etwa 22 % zurück. Anders verhält sich *Hypnum cupressiforme*. Auf der „unkarbonatisierten“ Normalbetonoberfläche nimmt es im Schnitt 99 % seiner Ausgangsfläche ein, die Flächen der karbonatisierten und frisch gebrochenen Oberfläche jedoch nur ca. 80 %. Auf den frisch gebrochenen Normalbetonproben war am 05.10.2018 kein *Brachythecium rutabulum* mehr vorhanden. *Brachythecium rutabulum* ist das einzige der Moose, das auf der karbonatisierten Normalbetonoberfläche höheres Flächenverhältnis aufwies, als auf den „unkarbonatisierten“. Es weist auf den karbonatisierten Proben 98 % und auf den „unkarbonatisierten“ 76 % seiner Ausgangsfläche auf.

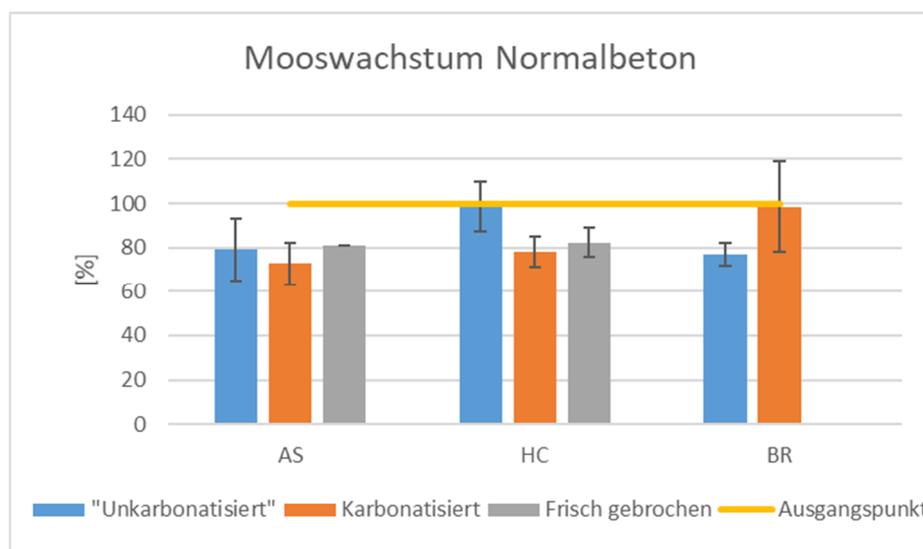


Abb. 5-41: Mooswachstum von AS, HC und BR am Normalbeton

Das Mooswachstum verläuft auf dem karbonatisierten, sowie auch am „unkarbonatisierten“ Drainbeton ähnlich. So ging *Amblystegium serpens* laut Abb. 5-42 auf dem „unkarbonatisierten“ Drainbeton um 18 % und auf dem karbonatisierten um 26 % zurück. Die Differenz dieser beiden Werte ergibt sich durch den abweichenden Messwert von 44 % des karbonatisierten Drainbetons. Berücksichtigt man diesen nicht in der Mittelwertberechnung, ergibt sich für den Moosrückgang auf dem karbonatisierten Drainbeton ein Wert von 21 %. Die Messwerte von *Hypnum cupressiforme* liegen beim CO₂-behandelten und beim unbehandelten Drainbeton bei 87 % und 91 %. Bei *Brachythecium rutabulum* entsprechen die gemessenen Flächen sowohl beim karbonatisierten wie auch beim „unkarbonatisierten“ Drainbeton 99 % ihrer Fläche vom 06.06.2018.

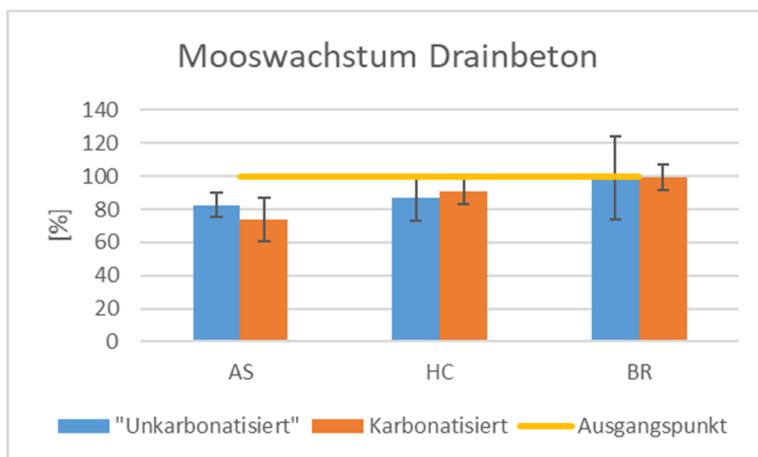


Abb. 5-42: Mooswachstum von AS, HC und BR am Drainbeton

Wie die Wachstumsgrafik des Substratbetons (Abb. 5-43) zeigt, ist *Amblystegium serpens* am 05.10.2018 um 40 % im Vergleich zum 06.06.2018 zurückgegangen. Auch *Hypnum cupressiforme* verlor 25 % seiner Fläche. Die Fläche von *Brachythecium rutabulum* nahm hingegen um 3 % zu.

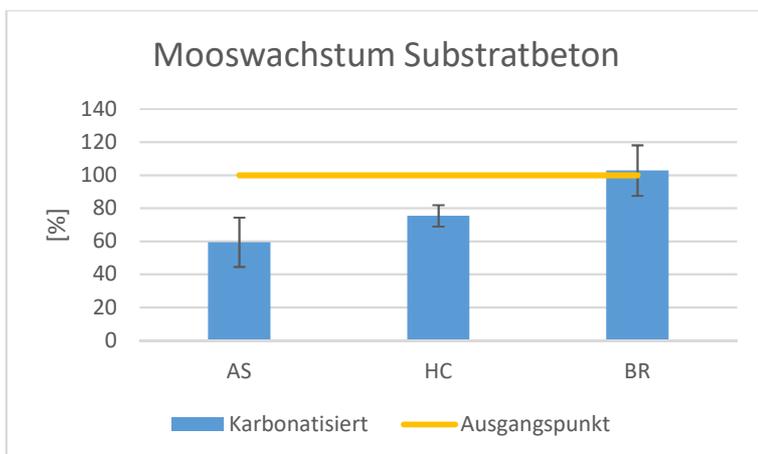


Abb. 5-43: Mooswachstum von AS, HC und BR am Substratbeton

Tabelle 5-13 zeigt eine Auflistung des Mooszuwachses, Mooswachstums und der Wirbelstrommessung der schattigen Auslagerung.

Ergebnisse

Tabelle 5-13: Auflistung Messergebnisse der schattigen Auslagerung

Methode	Kenngröße	Einheit	Ergebnisse							Kommentar
			Poröser UHPC	NB			DB		SB	
Optische Bildanalyse	Mooszuwachs aller Moosarten (06.06.-05.10.2018)	%	39	46			83		ungültig	Umfasst den gesamten Mooszuwachs mit allen Ausfällen.
	Mooszuwachs aller Moosarten (06.06.2018-15.05.2019)	%	42	54			99		ungültig	
	Wachstum der Moosarten (06.06.-05.10.2018)		karbonatisiert	Nicht karbonatisiert	Frisch gebrochen	karbonatisiert	Nicht karbonatisiert	karbonatisiert	ungültig	Betrachtet einzeln identifizierte Moosflächen.
	Amblystegium serpens	%	114	79	81	73	83	74		
	Hypnum cupressiforme	%	115	99	82	78	87	91		
	Brachythecium rutabulum	%	70	77	0	98	99	99		
	Rhynchosogon murale	%	0	0	0	0	0	0		Ausfall
Wirbelstrommessung	Feuchtigkeit der Oberseite	%	Siehe Tabelle 5-10 und Tabelle 5-12							Zeigt unterstützende Ergebnisse zum Wasseraufnahmeverhalten der Betone
	Feuchtigkeit der Unterseite	%								

6 Diskussion

Die Versuchsreihe der sonnigen Lagerung auf der Überdachung im Garten des Botanischen Gartens der Universität Graz zeigt, dass von den betrachteten Moosarten einzig *Schistidium crassipilum* und *Orthotrichum anomalum* unter den dort gegebenen Bedingungen auf Beton wächst. Ausschlaggebend dafür ist die direkte Sonneneinstrahlung und die damit einhergehenden hohen Temperaturen. Tabelle 5-9 listet eine Übersicht der gemessenen Standortfaktoren auf. Es zeigt sich, dass sowohl die Umgebungstemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit einer starken Schwankung unterliegen. Der karbonatisierte Drain- und Substratbeton weisen leichten Bewuchs auf, der poröse UHPC und Normalbeton ist jedoch frei von jeglichem Moosbewuchs. Am „unkarbonatisierten“ Drainbeton überlebte ausgetrocknetes *Schistidium crassipilum* und *Orthotrichum anomalum*, welches bei erneuter Betrachtung am 30.04.2019 Wachstum aufwies. Eine mögliche Erklärung für das Überleben des Mooses auf diesen Platten ist deren hohe Rauigkeit und ihr grob haufwerksporiges Gefüge. Durch die hohe Oberflächenrauigkeit kann sich das Moos mit Rhizoiden am Beton verankern. Durch seine grobe Haufwerksporigkeit nimmt der Drainbeton nicht nur auftretende Feuchtigkeit schnell auf und schafft ein feuchtes Habitat, sondern gibt bei Hitze die aufgenommene Feuchtigkeit schnell wieder ab. Dies erlaubt dem Moos auszutrocknen und in einen scheinbaren Zustand überzugehen, bevor es abstirbt.

Ein anderes Ergebnis zeigt die schattige Auslagerung. Mit Ausnahme der Versuchsplatten, die wegen der zu hohen Agar-Agar-Konzentration wegfallen (siehe 3.5.2), ist auf allen Betonplatten Moosbewuchs festzustellen. Die Menge und Art variiert aufgrund der Betoneigenschaften. Die aufgetretenen Temperaturen (siehe Tabelle 5-11) waren niedriger und unterlagen keiner so stark ausgeprägten Schwankung wie die der sonnigen Lagerung. Die am Beton untersuchten Faktoren sind in Tabelle 5-1 aufgelistet. Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass nicht alle am Beton gemessenen Faktoren Einfluss auf das Mooswachstum (Tabelle 5-13) haben.

In 3.3 wurde beschrieben, dass die Druck- sowie auch die Biegezugfestigkeit bei steigender Porosität im Allgemeinen abnimmt. Vergleicht man die Trendkurve zwischen Normal- und Drainbeton in Abb. 6-1 (punktierter Linie) mit der Abb. 3-2 dargestellten Abnahme der Biegezugfestigkeit bei zunehmendem Wasser zu Bindemittelverhältnis, so ist dieser Zusammenhang auch erkennbar. Betrachtet man jedoch den porösen UHPC, so stellt sich heraus, dass dieser trotz seiner höheren Gesamtporosität eine höhere Biegezugfestigkeit als der Normalbeton aufweist. Ursache dafür ist, dass der poröse UHPC seine hohe Porosität trotz des niedrigen W/B-Werts erhält, da er mit sehr haufwerksporigen Gefüge im Hermetik-Pressverfahren hergestellt wurde.

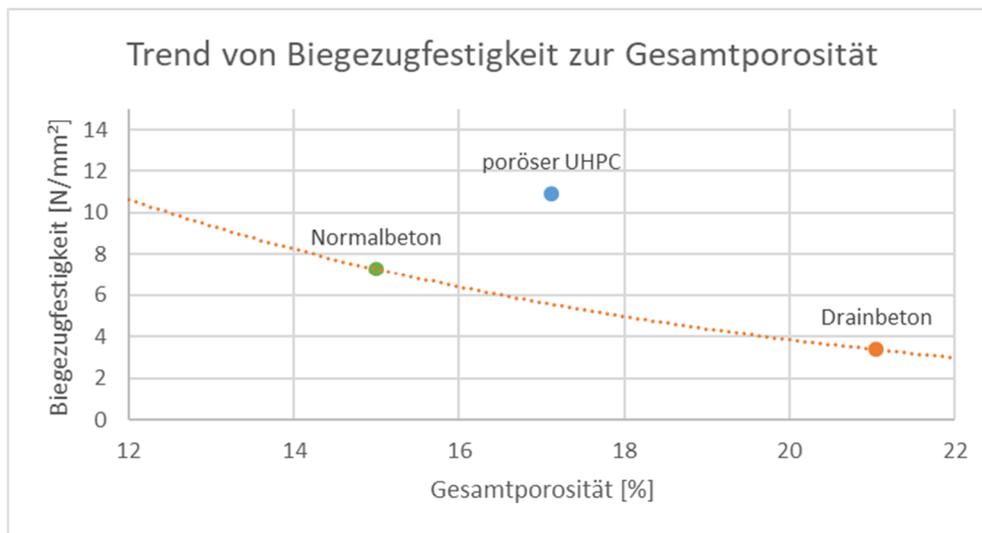


Abb. 6-1: Trend der Biegezugfestigkeit von porösem UHPC, NB und DB zur Gesamtporosität

Vergleicht man das Mooswachstum der einzelnen Moosarten zur Gesamtporosität der Betone (siehe Abb. 6-2) so zeigt sich, dass *Amblystegium serpens* und *Hypnum cupressiforme* bei niedriger Porosität (Normalbeton) schlechter wachsen als bei erhöhter Porosität (poröser UHPC). Wird diese jedoch weiter erhöht (Drainbeton), so fällt ihr Wachstumswert ab. Betrachtet man den Zuwachs aller Moosarten (siehe Abb. 6-2) so fällt dieser bei steigender Gesamtporosität vorerst ab (Normalbeton zu porösem UHPC) und steigt bei weiterer Erhöhung wieder (Drainbeton). Es kann also nicht allein von der Gesamtporosität auf das Mooswachstum und den Mooszuwachs geschlossen werden.

Vergleicht man das Mooswachstum aus Abb. 6-2 mit den Werten der Biegezugfestigkeit aus Abb. 6-1 (die Gesamtporosität überschneidet sich), so liegen die Wachstumswerte beim Normalbeton und beim Drainbeton bei *Amblystegium serpens* und *Hypnum cupressiforme* nahe aneinander. Dies hängt offenbar nicht mit ihren deutlich unterschiedlichen Biegezugfestigkeiten zusammen. Auch das Wachstumsverhalten von *Brachythecium rutabulum* verläuft divergent zur Biegezugfestigkeit der Betone. Dies führt zu dem Schluss, dass die Biegezugfestigkeit keinen direkten Einfluss auf das Mooswachstum hat.

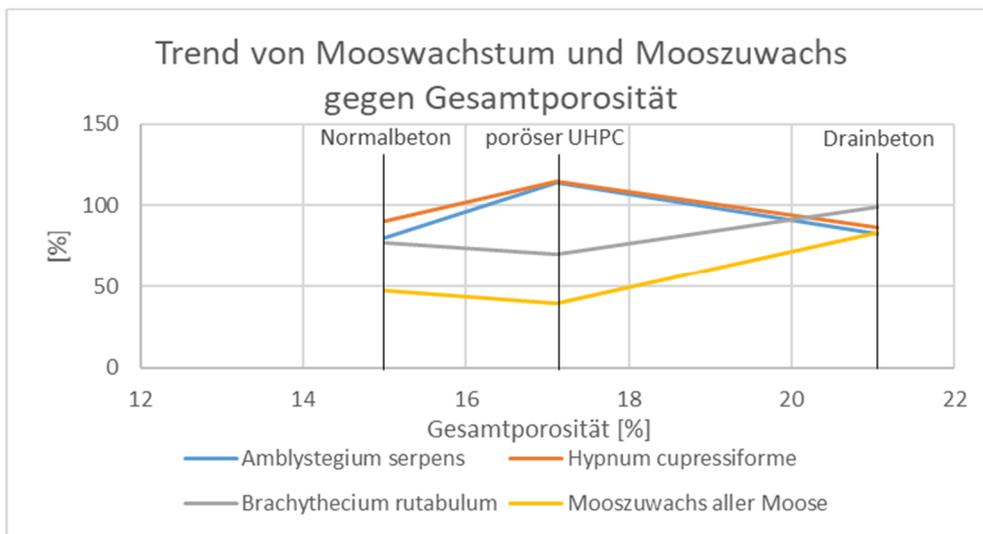


Abb. 6-2: Trend des Mooswachstums von AS, HC und BR und des Gesamtzuwachses aller Moose zur Gesamtporosität

Ein Faktor, der Einfluss auf das Wachstumsverhalten von Moos hat, ist die Oberflächenrauigkeit. Sehen wir uns den Zusammenhang von der Rautiefe und Mooszuwachs in Abb. 6-3 an, so ist eine eindeutige, positive Tendenz erkennbar.

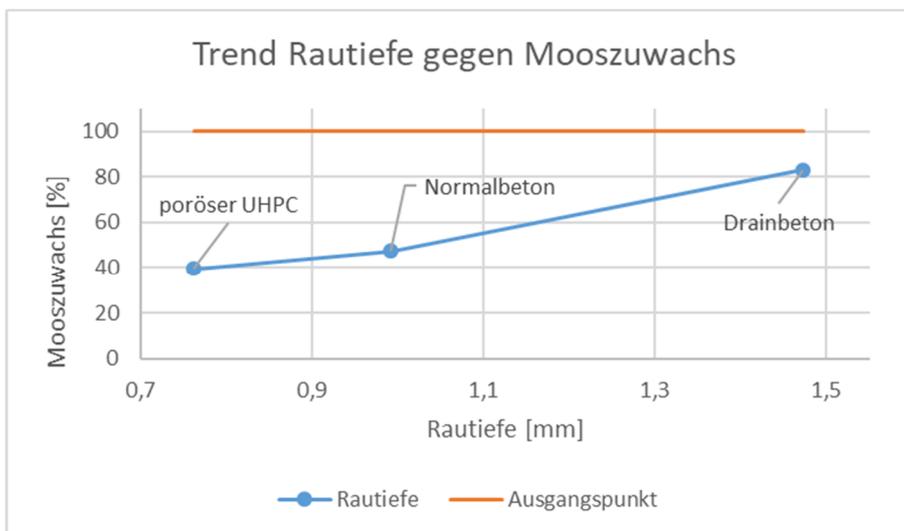


Abb. 6-3: Trend der Rautiefe der Betone gegen den Mooszuwachs

Diese Tendenz spiegelt sich auch im Wachstum von *Brachythecium rutabulum* wider (siehe Abb. 6-4). Das Wachstum *Amblystegium serpens* und *Hypnum cupressiforme* nimmt bei steigender Rautiefe etwas ab. Da *Brachythecium rutabulum* auch bei den weniger rauen Betonen nur in Verbindung mit den anderen Moosen auftritt, wird angenommen, dass es sich an einer glatten Oberfläche nicht selbst verankern kann. Daher ist für ein Wachstum dieser Moosart ein raues Substrat förderlich. Die Rautiefe hat also direkten Einfluss auf den Mooszuwachs aller vier Moosarten, aber nur indirekten Einfluss auf das Wachstum von *Brachythecium rutabulum*. Bezüglich des Wachstums von *Amblystegium serpens* und *Hypnum cupressiforme* scheint eine geringe Rauigkeit (poröser UHPC $t \approx 0,8$ mm) auszureichen.

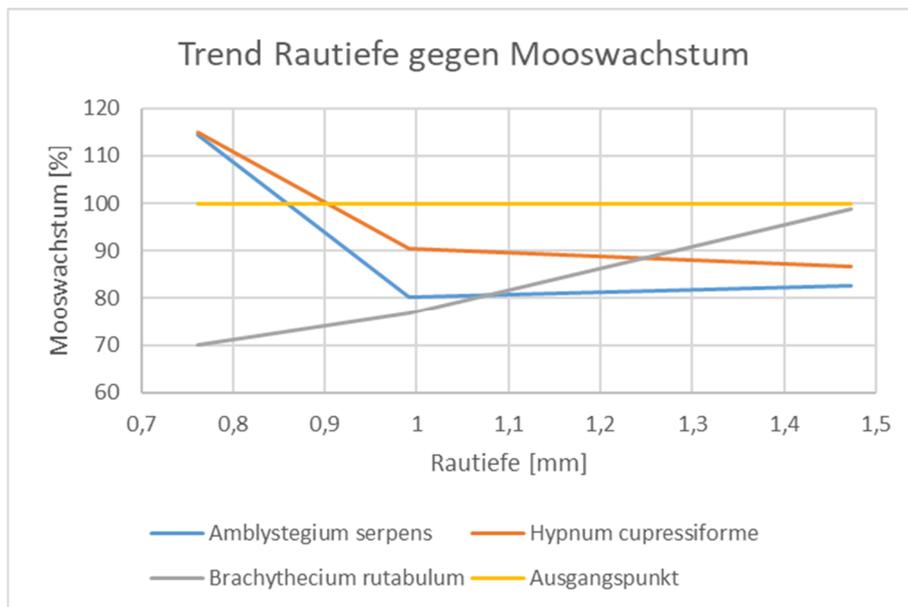


Abb. 6-4: Trend der Rautiefe gegen das Mooswachstum

Bei näherer Betrachtung der Wasseraufnahmeeigenschaften der Betone zeigt sich, dass keine Aussage zum Mooswachstum getroffen werden kann, ohne mehrere Faktoren zu berücksichtigen. Abb. 6-5 zeigt eine Gegenüberstellung von offener Porosität, Mooszuwachs und Mooswachstum. Der dichteste Beton der Versuchsreihe, der Normalbeton, weist mit 12,4 % den geringsten Anteil an offener Porosität auf. Beim porösen UHPC steigt sich dieser Wert auf 15,2 %. Das Mooswachstum der einzelnen Moose nimmt bis auf *Brachythecium rutabulum* zu. Der Gesamtzuwachs nimmt ab. Einen höheren Anteil an offenen Poren erreicht der Drainbeton mit 18,1 %. Im Vergleich zum porösen UHPC nimmt beim Drainbeton das Wachstum von *Amblystegium serpens* und *Hypnum cupressiforme* ab und *Brachythecium rutabulum* nimmt zu. Gleich wie *Brachythecium rutabulum* verhält sich auch der Gesamtzuwachs der Moose. Es ist kein direkter Zusammenhang von offener Porosität, Mooszuwachs und Mooswachstum erkennbar.

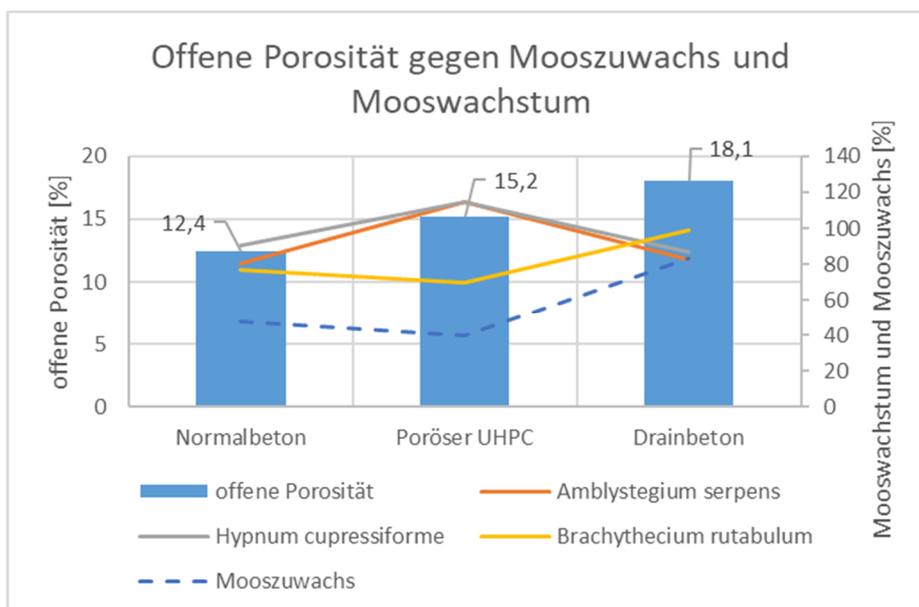


Abb. 6-5: Offene Porosität von porösem UHPC, Normalbeton und Drainbeton gegen Mooszuwachs und Mooswachstum

Abb. 6-6 illustriert den Wasseraufnahmekoeffizienten gegen Mooszuwachs und Mooswachstum. Der Normalbeton weist mit $20 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$ den niedrigsten Wasseraufnahmekoeffizienten nach 5 Minuten und somit die langsamste kapillare Wasseraufnahme auf, zudem hat er den geringsten Anteil an offenen Poren. Der Wasseraufnahmekoeffizienten des porösen UHPC ist um einen Faktor von 1,75 größer als der des Normalbetons. Dies ist auf sein feines haufwerksporiges Gefüge zurückzuführen, welches sich auch in seinem größeren offenen Porenraum widerspiegelt. Wie auch anhand der Absorptionsisotherme (siehe Abb. 5-16) der Betone klar wird, nimmt der poröse UHPC deutlich mehr Feuchtigkeit aus der Luft auf, als die anderen betrachteten Betone. Dies gute Feuchtespeicherung des Betons führt zu einem guten Wachstum von *Amblystegium serpens* und *Hypnum cupressiforme*. Der Drainbeton weist einen Wasseraufnahmekoeffizient nach 5

Minuten von $312 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$ auf, dies entspricht einer 15,6-mal schnelleren Wasseraufnahme als die des Normalbetons, bzw. einer 8,9-mal schnelleren Wasseraufnahme als die des porösen UHPC. Dies ist auf den groben Haufwerksporenraum von dem Beton zurückzuführen. Die schnelle Aufnahme des Wassers bedeutet allerdings auch schnelle Abgabe des Wassers, dies ist ein Faktor für das Überleben des Mooses bei sonniger Lagerung der Platten (siehe 5.5.1). Die Absorptionsisotherme (siehe Abb. 5-16) zeigt außerdem, dass der Drainbeton ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von $< 50 \%$ weniger Feuchtigkeit aus der Luft aufnimmt, als die anderen Betone. Dies ist auf das Auftreten der Kapillarkondensation ab einer relativen Luftfeuchte von $> 40 \%$ zurückzuführen. Dabei wird Wasser in Poren mit einem Durchmesser < 10 Micrometer eingelagert (Hunkeler & Holtzhauer, 1994). Da die Haufwerksporen des Drainbetons aber einen Radius von bis zu 2,5 mm aufweisen, tritt nur wenig Kapillarkondensation auf. Bei einem Regenereignis nimmt der Drainbeton das auftretende Wasser schnell auf und gibt es auch schnell wieder an seine Umgebung ab. Der Drainbeton stellt also trotz seiner hohen offenen Porosität ein im Vergleich zum porösen UHPC trockeneres Substrat dar.

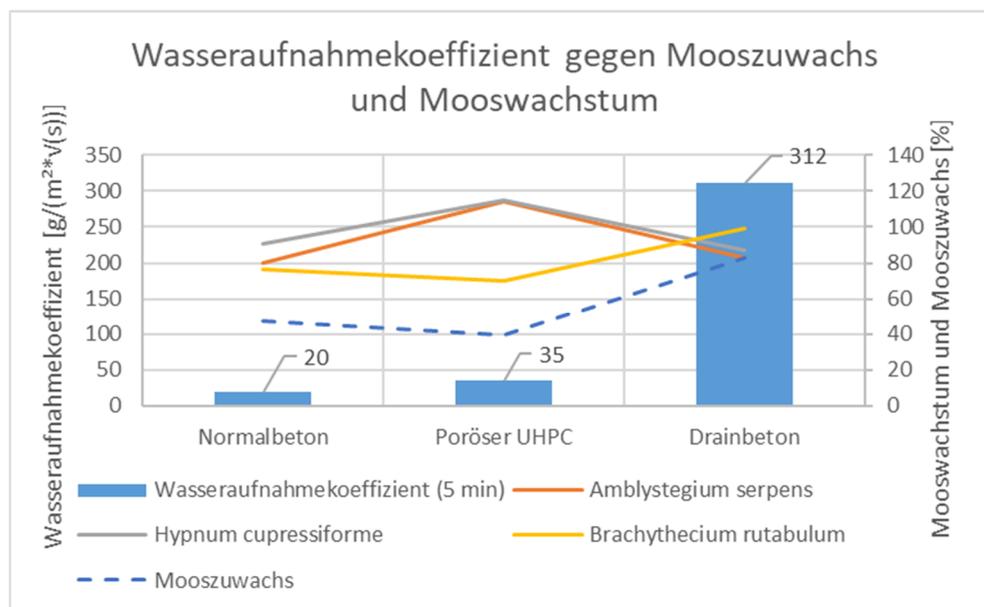


Abb. 6-6: Wasseraufnahmekoeffizient von porösem UHPC, Normalbeton und Drainbeton gegen Mooszuwachs und Mooswachstum

Dies spiegelt sich auch im in Abb. 6-7 dargestellten Oberflächenfeuchte der Betone wider. Am besten wächst *Amblystegium serpens* und *Hypnum cupressiforme* am porösen UHPC, der auch die höchste Oberflächenfeuchtigkeit im Vergleich aufweist. Einzig *Brachythecium rutabulum* wächst auf dem Drainbeton besser, was weniger mit dessen Feuchtigkeitseigenschaften, als mit seiner Oberflächenrauigkeit zusammenhängt. Der Normalbeton weist weniger Oberflächenfeuchtigkeit als der poröse UHPC, aber mehr als der Drainbeton auf. Das Mooswachstum von *Hypnum cupressiforme* ist auf ihm geringer als am porösen

UHPC, aber etwas besser als am Drainbeton. Die anderen Moose wachsen auf ihm im Vergleich schlechter. Eine gute Feuchtespeicherung von Beton (in Form von feinen Haufwerksporen) wirkt sich positiv auf das Wachstum von Moos aus. Da beim Gesamtzuwachs aller Moose die Gesamtfläche der Moose inklusive aller Ausfälle (z.B. verwehtes Moos) betrachtet wird, hängt es direkt mit der Oberflächenrauigkeit (also einer guten Verankerung der Moose) zusammen. Die Summe des Wachstums der einzelnen Moose stellt die Gesamtfläche der Moose dar. Das heißt, ohne Ausfall von Moosen ist die Summe des Einzelwachstums der Moose gleich dem Gesamtzuwachs. Durch diesen Zusammenhang kann gesagt werden, dass gute Feuchtespeicherung sich positiv auf den Mooszuwachs auswirkt, aber bei Ausfall eine nebenrangige Position einnimmt.

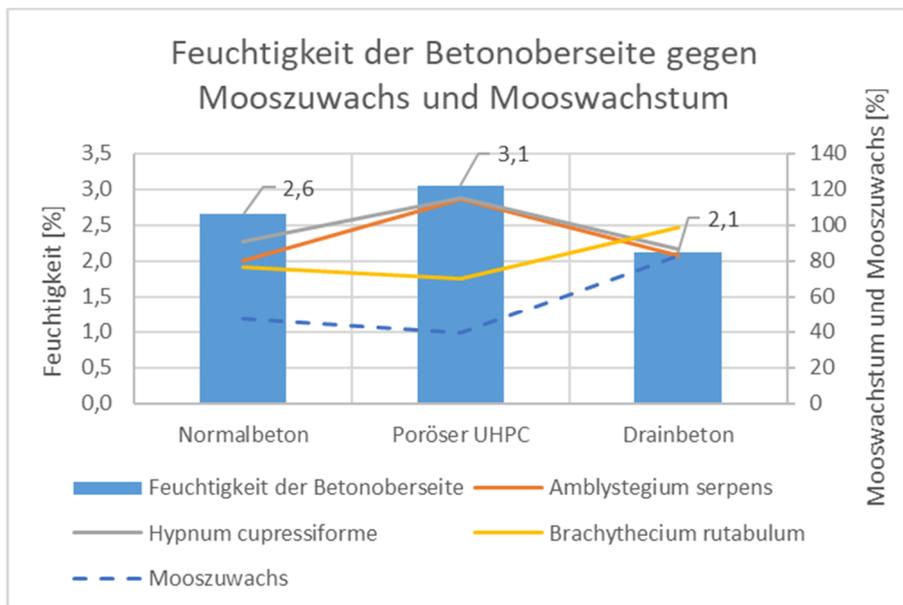


Abb. 6-7: Feuchtigkeit der Betonoberseite von porösem UHPC, Normalbeton und Drainbeton gegen Mooszuwachs und Mooswachstum

Der pH-Wert im Inneren des Betons hatte keinen messbaren Einfluss auf das Mooswachstum. Alle Proben erwiesen sich als oberflächlich karbonatisiert, allerdings mit unterschiedlichen Karbonatisierungstiefen. Das bedeutet, dass der Oberflächen-pH-Wert im neutralen Bereich lag, während im Inneren alkalisches Milieu vorherrschte (siehe 5.4). Aufgrund unterschiedlicher Wasserleitfähigkeiten kommt es bei Durchfeuchtung und kapillarem Wassertransport des Betons an der Oberfläche zu einer unterschiedlich stark ausgeprägten Erhöhung des pH-Werts in der oberflächennahen Zone (siehe 5.4.2). Trotzdem wurde kein signifikanter Einfluss der Karbonatisierungstiefe, bzw. der pH-Erhöhung auf das Mooswachstum festgestellt. Abb. 6-8 zeigt eine Auflistung von Normal- und Drainbeton mit unterschiedlich vorbehandelten Oberflächen. Dazu muss angemerkt werden, dass die karbonatisierten Betone (strichliert) bei der zweiten Auslage mit einer zu hohen Agar-Agar-Mischung aufgebracht wurden, die somit

keine repräsentativen Werte darstellen und hier nur unterstützend angeführt werden. Es ist dennoch zu beachten, dass bei unpassendem pH-Wert das darauf befindliche Moos trotzdem abgestorben wäre. Die Aussage, dass der pH-Wert eine nebenrangige Position einnimmt, wird zudem von dem Faktum gestützt, dass bei der schattigen Lagerung kein *Rhynchosygium murale* überlebt hat, obwohl es ist das basophilste Moos dieses Vergleichs ist. Eine mögliche Erklärung für die Nebenrolle des pH-Werts ist, dass der natürliche Anteil an CO₂ in der Umgebungsluft den Oberflächen-pH-Wert des Betons so weit senkt, dass Mooswachstum möglich ist.

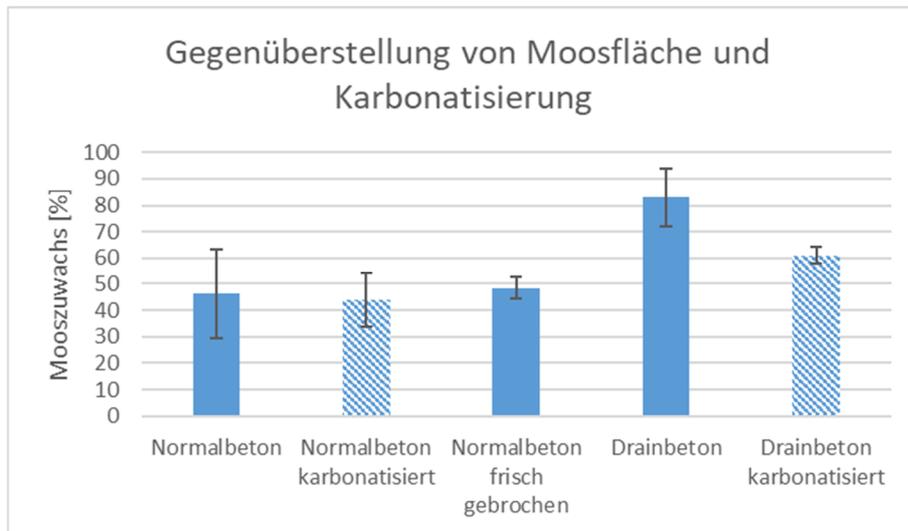


Abb. 6-8: Gegenüberstellung von Mooswachstum und Karbonatisierung der Betone

7 Schlussfolgerungen, Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden vier unterschiedliche Betone hinsichtlich ihrer für Mooswachstum relevanten Eigenschaften analysiert und Messergebnisse mit einem Feldversuch, in dem Betonplatten mit Moos besiedelt wurden, überprüft. Es zeigte sich, dass sich Beton als Moossubstrat eignet. Allerdings schließt das nicht alle betrachteten Moosarten ein und fordert je nach Umgebung andere Eigenschaften vom Beton.

Im Rahmen des Feldversuchs wurden Betonplatten mit Moos in schattiger und sonniger Umgebung ausgelagert. Nur in schattiger Lagerung gibt es nennenswertes Mooswachstum über den Beobachtungszeitraum eines Jahres. Im Mittel Tageshöchsttemperaturen von 25°C und eine mittlere relative Luftfeuchtigkeit von 91 % erreicht. Es war auf jeder der ausgelagerten Betonproben Mooszuwachs messbar. *Amblystegium serpens* haftet am Beton und bildet feine Rasen, die auf Wachstum zurückführen. Auch *Hypnum cupressiforme* haftet am Beton, *Brachythecium rutabulum* hingegen haftet nur stellenweise am Beton und wächst ansonsten in Verbindung mit anderen Moosen am Beton. Lediglich *Rhynchostegium murale* konnte auf keiner der Betonplatten aufgefunden werden. In der von Sonneneinstrahlung ungeschützten Versuchsumgebung (am Dach) wurden im Mittel Tageshöchsttemperaturen von 43°C und eine mittlere relative Luftfeuchtigkeit von 64 % gemessen. Auf dem porösen UHPC und am Normalbeton konnte kein Moos mehr festgestellt werden. Lediglich auf dem besonders porösen, oberflächenrauen Drain- und Substratbeton überlebten *Schistidium crassipilum* und *Orthotrichum anomalum* rudimentär. Diese wurden im Frühjahr 2019 wieder stoffwechselaktiv.

Die analysierten Betoneigenschaften umfassen Biegezugfestigkeit, pH-Wert, Wasseraufnahme und Oberflächenrauigkeit.

Erhöhte Festigkeit ist in der Regel mit einer geringen Porosität verbunden, was sich negativ auf das Mooswachstum auswirkt. Der in diesem Versuch verwendete poröse UHPC (er wurde speziell mit erdfeuchter Konsistenz im Hermetik-Verfahren hergestellt) weist eine höhere Porosität und auch Biegezugfestigkeit als der verwendete Normalbeton auf. Auf dem porösen UHPC ist zudem besseres Mooswachstum als am Normalbeton festzustellen. Es kann also kein Zusammenhang zwischen der Biegezugfestigkeit des Betons und dem Wachstum des Mooses festgestellt werden.

Der gemessene Oberflächen-pH-Wert der Betone bewegt sich bei allen Proben im gleichen Bereich. Stark karbonatisierte, nur oberflächlich karbonatisierte und frisch gebrochene Proben scheinen keinen signifikanten Einfluss auf das Mooswachstum zu haben. Eine mögliche Erklärung dafür kann sein, dass der

natürliche Anteil an CO₂ in der Umgebungsluft den Oberflächen-pH-Wert des Betons so weit senkt, dass Mooswachstum möglich ist und der pH-Wert im Inneren des Betons nur untergeordnete Bedeutung hat.

Hinsichtlich ihrer Wasseraufnahme unterscheiden sich die verwendeten Betone deutlich. Kapillar nehmen Drain- und Substratbeton innerhalb von Minuten ihre maximale Kapazität an Wasser auf. Der poröse UHPC und der Normalbeton nähern sich erst nach 24 Stunden ihrem Maximalwert an, wobei der poröse UHPC eine deutlich höhere Speicherkapazität hat, als der untersuchte Normalbeton (ein dichter Normalbeton mit hoher Festigkeit). Aus der optischen Analyse des Mooswachstums im schattigen Habitat geht hervor, dass sich die länger anhaltende Feuchte des Betons sich positiv auf das Wachstum des Mooses auswirkt. Der poröse UHPC bewerkstelligt dies durch sein feines haufwerksporiges Gefüge. Auf dem dichteren, weniger porösen Normalbeton wurde in der Regel geringeres Mooswachstum festgestellt. In sonniger Umgebung wächst am porösen UHPC kein Moos. Anders ist das am Drainbeton, bzw. teilweise am Substratbeton. Ursache dafür kann die verringerte Hitzeresistenz von Moosen im befeuchteten Zustand sein. Der Drainbeton nimmt durch seinen hohen Anteil an groben Haufwerksporen Feuchtigkeit schnell auf und gibt diese auch schnell wieder ab, wodurch die Betonoberfläche und somit auch das darauf befindliche Moos bei auftretender Hitze nach einem Regenereignis schnell austrocknen. Der poröse UHPC, sowie auch der Normalbeton nehmen Feuchtigkeit langsamer auf und geben sie auch langsamer wieder ab. Das führt dazu, dass bei Hitze nach einem Regenereignis das Moos feucht gehalten wird und es in weiterer Folge nicht das gleiche Maß an Hitzeresistenz erreicht, wie komplett getrocknetes Moos. Der Einfluss des eingepressten Tons des Substratbetons ist wegen der missglückten Aufbringung des Mooses mit zu hohem Agar-Agar-Verhältnis nicht messbar.

Es kann davon ausgegangen werden, dass eine gewisse Rauigkeit des Betons Grundvoraussetzung für die Verankerung von Moos auf seiner Oberfläche ist. Dafür scheint eine Rautiefe von 0,8 mm für *Amblystegium serpens* und *Hypnum cupressiforme* ausreichend zu sein (poröser UHPC). *Brachythecium rutabulum* ist bei dieser Rautiefe allerdings beinahe komplett ausgefallen, was zu dem Schluss führt, dass diese Art eine höhere Rautiefe bevorzugt. Der Einfluss der Rautiefe wird besonders im Vergleich des Mooszuwachses am Beton deutlich. Am porösen UHPC, der im Vergleich die geringste Oberflächenrauigkeit aufweist, ist am wenigsten Mooszuwachs gemessen worden (39 % der Ausgangsfläche). Etwas mehr Mooszuwachs (46 %) verzeichnete der rauere Normalbeton. Am meisten Mooszuwachs wurde am Drain- bzw. Substratbeton (DB: 83 %/ 61 %, SB: 72 %) gemessen. Diese Betone weisen auch die höchste Rauigkeit der Versuchsreihe auf. Die Rauigkeit ist auch ein Faktor für das Überleben des Mooses der sonnigen Auslagerung, da auf dem Dach Umwelteinflüsse, wie Wind und Regen nicht verankertes Moos leicht abtragen.

Der oberflächenraue Drainbeton zeigte die besten Ergebnisse hinsichtlich des Mooszuwachses aller Moosarten. Fein haufwerksporiger, poröser UHPC unterstützte aber am besten das Wachstum von zwei der vier aufgetragenen Moosarten. Für schattiges Habitat empfiehlt es sich die Vorteile dieser beiden Betone zu kombinieren, also einen oberflächenrauen Beton mit den Wasseraufnahmeeigenschaften des porösen UHPC zu entwickeln. Dies könnte durch die Wahl einer zusätzlichen, kleineren Gesteinskörnung als Ergänzung des Mischungsverhältnisses des Drainbetons erreicht werden. Dadurch könnte der Durchmesser der Haufwerksporen des Drainbeton insoweit verkleinert werden, dass einerseits effektive Kapillarkondensation stattfinden und andererseits eine verlangsamte Wasserabgabe gewährleistet werden kann. Zusätzlich kann man die Verwendung von Leichtzuschlägen andenken, da diese meist sehr porös sind und eine Wasserabsorption begünstigen. Bei erneuter Auslagerung von Proben empfiehlt es sich dieselbe Betonmischung in sandgestrahlter, unbehandelter und geschliffener Form zu verwenden, da dadurch der Einfluss der Oberflächenrauigkeit besser deutlich gemacht werden kann.

Die Durchschnittstemperatur in Österreich steigt seit 25 Jahren um 1°C an und die Prognose des Temperaturanstiegs der nächsten Jahre liegt noch höher (Umweltbundesamt, 2019a). Dies betrifft insbesondere das Stadtgebiet, in welchem zusätzlich eine hohe CO₂- und Feinstaubbelastung herrscht. Dort liegt aber auch das größte Potential, diesen Belastungen entgegenzuwirken. Bei den in dieser Arbeit ausgelagerten Betonplatten mit Moosbewuchs wurden außer dem einmaligen Aufbringen von Agar-Agar keine zusätzlichen Maßnahmen zur Bewässerung oder Förderung des Mooswachstums getroffen. Somit entsteht durch sie keinerlei Wartungsaufwand, was bei groß angelegten Projekten einen deutlichen Kostenfaktor ausmacht. Es empfiehlt sich Moos auf nicht direkt sonnenbestrahlte Flächen (z.B. Nordfassaden, Nord/Ost ausgerichtete Infrastrukturbauwerke) aufwachsen zu lassen. Dafür reicht eine ca. 5-20 mm dicke, oberflächliche Betonschicht aus, die so rau und porös gestaltet ist, dass ausreichende Verankerung und Feuchtespeicherung gegeben ist.

Um ein behagliches Leben in Städten auch zukünftig zu gewährleisten, ist es zwingend notwendig mit Beton versiegelte Flächen in ihren „Klima-Eigenschaften“ zu verbessern. Warum also diese nicht einfach mit Moos überwachsen lassen?

Literaturverzeichnis

- Abel W. O. (1956) „Die Austrocknungsresistenz der Laubmoose“, Sitzungsberichte d. mathem.-naturw. KL. Abt. 1, **165**, 619–707.
- Bannwarth H., Kremer B. P., & Schulz A. (2011) „Basiswissen Physik, Chemie und Biochemie“, Springer-Verlag, Berlin.
- Buch H. (1945) „Über die Wasser- und Mineralstoffversorgung der Moose“, Societas scientiarum fennica.
- Bundesministerium Verkehr Innovation und Technologie (2018) „Innovationen für kühle Stadtoasen“, energy innovation austria, **3**. [online] https://www.energy-innovation-austria.at/wp-content/uploads/2018/08/eia_03_18_fin_deutsch.pdf.
- Department of Economic and Social Affairs Population Division (2014) „World Urbanization Prospects: The 2014 Revision“, [online] <http://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/globalisierung/52705/verstaedterung?zahlenfakten=detail> (Zugegriffen 10. August 2018).
- Dunnick J. K. & Hailey J. R. (1996) „Phenolphthalein exposure causes multiple carcinogenic effects in experimental model systems“, Cancer Research, **56**(21), 4922–4926.
- Ekström T. (2001) „Leaching of concrete: experiments and modelling“, Division of Building Materials, LTH, Lund University.
- Elbert W., Weber B., Burrows S., Steinkamp J., Büdel B., Andreae M. O., & Pöschl U. (2012) „Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen“, Nature Geoscience, **5**(7), 459–462. [online] <http://www.nature.com/articles/ngeo1486> (Zugegriffen 22. August 2018).
- Ellenberg H., Weber H., Düll R., Volkmar W., & Werner W. (2001) „Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa“, Verlag Erich Goltze GmbH & Co KG, Göttingen.
- Frahm J.-P. (2001) „Biologie der Moose“, Spektrum Akademischer Verlag, Berlin.
- Frahm J.-P. (2006) „Moose. Eine Einführung.“, Weissdorn-Verlag Jena, Jena.
- Frahm J.-P. (2007) „Moose reduzieren die Feinstaubbelastung“, Pressemitteilung Universität Bonn. [online] <https://www.uni-bonn.de/neues/moose-reduzieren-die-feinstaubbelastung> (Zugegriffen 30. Jänner 2019).
- Frahm J.-P. & Sabovljevic M. (2007) „Feinstaubreduzierung durch Moose“, Immissionsschutz, **12**(4), 152–156.
- Funk P. (2015) „CityTrees in Oslo“, [online] <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/umwelt/wie-waende-moos-luft-in-staedten-verbessern/> (Zugegriffen 5. August 2018).

- Götz U. (2017) „Mit einer Mooswand gegen den Feinstaub“, [online] https://www.deutschlandfunkkultur.de/weltweit-erster-versuch-in-stuttgart-mit-einer-mooswand.1001.de.html?dram:article_id=383603 (Zugegriffen 6. August 2018).
- Green City Solutions (2018) „Citytree - Bench Model“, [online] <https://greencitysolutions.de/losungen/> (Zugegriffen 5. August 2018).
- Grengg C., Müller B., Staudinger C., Mittermayr F., Breininger J., Ungerböck B., Borisov S. M., Mayr T., & Dietzel M. (2019) „High-resolution optical pH imaging of concrete exposed to chemically corrosive environments“, *Cement and Concrete Research*, **116**, 231–237. [online] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884618307051> (Zugegriffen 27. Februar 2019).
- Hermann K. (2000) „Betonfeuchte“, *Cementbulletin*, **68**(10). [online] <http://doi.org/10.5169/seals-153864%0ANutzungsbedingungen>.
- Hofbauer W., Breuer K., & Sedlbauer K. (2003) „Algen, Flechten, Moose und Farne auf Fassaden“, *Bauphysik*, **25**(November), 383–396. [online] <https://doi.org/10.1002/bapi.200301660>.
- Hunkeler F. (2012) „Einfluss des CO₂-Gehaltes, der Nach- und Vorbehandlung sowie der Luftfeuchtigkeit auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Beton“, *Beton- und Stahlbetonbau*, **107**(9), 613–624.
- Hunkeler F. & Hermann K. (1999) „Karbonisierung von Betonen“, *Cementbulletin*, **67**(12).
- Hunkeler F. & Holtzhauer K. (1994) „Mörtel und Beton: Wassergehalt, Porosität und elektrischer Widerstand“, *Schweizer Ingenieur und Architekt*, **112**(27/28). [online] <http://doi.org/10.5169/seals-78475%0ANutzungsbedingungen>.
- Kumar R. & Bhattacharjee B. (2003) „Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete“, *Cement and Concrete Research*, **33**, 155–164.
- Landolt E., Bäumler B., Erhardt A., Hegg O., Klötzli F., Lämmli W., Nobis M., Rudmann-Maurer K., Schweingruber F., Theurillat J.-P., Urmi E., Vust M., & Wohlgemuth T. (2010) „Flora indicativa - Ökologische Zeigerwerte und biologische Kennzeichen zur Flora der Schweiz und der Alpen“, Haupt Verlag, Bern.
- Lange O. L. (1955) „Untersuchungen über die Hitzeresistenz der Moose in Beziehung zu ihrer Verbreitung. I. Die Resistenz stark ausgetrockneter Moose“, *Flora*, **142**(3), 381–399. [online] [http://dx.doi.org/10.1016/S0367-1615\(17\)33089-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0367-1615(17)33089-6).
- Leemann A. & Moro F. (2017) „Carbonation of concrete – the role of CO₂ concentration, relative humidity and CO₂ buffer capacity“ in *Materials and Structures*.
- Leschnik W. (1999) „Feuchtemessung an Baustoffen – Zwischen Klassik und

- Moderne“ in Feuchtetag `99. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- Linder R. (1998) „Wasserundurchlässige Baukörper aus Beton“, Betonkalender 1998, (Teil II), 383–440.
- Meinunger L. & Schröder W. (2007) „Verbreitungsatlas der Moose Deutschlands“, Eigenverlag der Regensburgischen Botanischen Gesellschaft, Regensburg.
- Müller B., Grengg C., Staudinger C., Breininger J., Sakoparnig M., Borisov S. M., Mittermayr F., Dietzel M., Mayr T., Schallert V., & Ungerböck B. (2018) „Wide-range optical pH imaging of cementitious materials exposed to chemically corrosive environments“, RILEM Technical Letters, **3**, 39–45.
- Nebel M. (2018) „Die Mooswand in Stuttgart“, Umweltzeitung, 26–27.
- Nörr M. (1974) „Trockenresistenz bei Moosen“, Flora, **163**, 371–387.
- ÖNorm EN 1339: 2007-01-01 „Platten aus Beton Anforderungen und Prüfverfahren“, Austrian Standards Institute.
- ÖNorm EN 14630: 2007-01-01 „Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken — Prüfverfahren — Bestimmung der Karbonatisierungstiefe im Festbeton mit der Phenolphthalein-Prüfung“, Austrian Standards Institute.
- ÖNorm EN 1936: 2007-02-01 „Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und Gesamtporosität“, Austrian Standards Institute.
- ÖNorm EN 722-11: 2011-06-15 „Prüfverfahren für Mauersteine Teil 11: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Mauersteinen aus Beton, Porenbetonsteinen, Betonwerksteinen und Natursteinen sowie der anfänglichen Wasseraufnahme von Mauerziegeln“, Austrian Standards Institute.
- ÖNorm EN 771-4: 2005-06-01 „Festlegungen für Mauersteine Teil 4: Porenbetonsteine“, Austrian Standards Institute.
- Pitha U., Scharf B., Enzi V., Mursch-Radlgruber E., Trimmel H., Seher W., Eder E., Haslsteiner J., Allabashi R., & Oberhuber A. (2013) „GrünStadtKlima“, Wien.
- Pont U., Heiduk E., Zechmeister H., Schmidt S., Moser D., Zmelik K., Wolosiuk D., Schuss M., Sustr C., Kiesel K., & Mahdavi A. (2018) „Sondierung für die Entwicklung von moosbewachsenen Gebäudefassadenpaneelen“, Wien.
- Proctor M. C. F. (1990) „The physiological basis of bryophyte production“, Botanical Journal of the Linnean Society, **104**, 61–77.
- Schröder C. R., Weidgans B. M., & Klimant I. (2005) „pH fluorosensors for use in marine systems“, Analyst, **130**(6), 907–916.

- Schwarz K. (2018) „Moos an der B 14 kommt weg“, Stuttgarter Nachrichten. [online] <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.versuch-moos-an-der-b-14-kommt-weg.72871de4-93a3-4519-aa97-1bb2f24f45e4.html> (Zugegriffen 6. August 2018).
- SMNStuttgart (2017) „Pilotstudie Mooswand“, smnstuttgart-blog. [online] <https://smnstuttgart.com/2017/09/05/pilotstudie-mooswand/> (Zugegriffen 6. August 2018).
- Spektrum Akademischer Verlag (2001a) „Kompaktlexikon der Biologie-homoiohydrisch“, Kompaktlexikon der Biologie. [online] <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/homoiohydrisch/5609> (Zugegriffen 20. August 2018).
- Spektrum Akademischer Verlag (2001b) „Kompaktlexikon der Biologie-Pinocytose“, Kompaktlexikon der Biologie. [online] <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/pinocytose/9085> (Zugegriffen 22. August 2018).
- Spektrum Akademischer Verlag (2001c) „Kompaktlexikon der Biologie-poikilohydrisch“, Kompaktlexikon der Biologie. [online] <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/poikilohydrisch/9215> (Zugegriffen 20. August 2018).
- Stefan J. (1889) „Über die Diffusion von Säuren und Basen gegen einander“, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien - mathematisch-naturwissenschaftliche Classe, **98–2a**, 616–634.
- Stehno G. (1981) „Baustoffe und Baustoffprüfung“, Springer, Vienna.
- Steinlein C. (2007) „Moos-Geheimwaffe gegen Feinstaub“, Focus Online. [online] https://www.focus.de/wissen/natur/moos_aid_68770.html (Zugegriffen 22. August 2018).
- Südwestrundfunk (2018) „Die Mooswand ist abgebaut“, [online] <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/stuttgart/Gegenschlechte-Luft-in-Stuttgart-Die-Mooswand-ist-abgebaut,mooswand-abgebaut-100.html> (Zugegriffen 8. August 2018).
- Swissbryophytes (2018) „Grimmia pulvinata“, [online] https://www.swissbryophytes.ch/index.php/de/lebensraum?taxon_id=nism-1467 (Zugegriffen 4. Februar 2019).
- Trithart J. (1989) „Zur Korrosion von Stahl in Beton“, Österreichische Ingenieur- und Architekten Zeitschrift, **134**(12).
- Umweltbundesamt (2019a) „Beobachtete Änderungen“, [online] http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/klima/klimawandel/klimawandel_aenderung/ (Zugegriffen 2. Mai 2019).
- Umweltbundesamt (2019b) „Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte“, [online] http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/luftguete_aktuell/grenzwerte/ (Zugegriffen 29. Jänner 2019).

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) (2012) „Biological concrete for constructing ‚living‘ building materials with lichens, mosses“, ScienceDaily. [online] <https://www.sciencedaily.com/releases/2012/12/121220080310.htm> (Zugegriffen 6. August 2018).

Zechmeister H. (2009) „Erfassung der Vorkommen von Moosarten des Anhanges II der FFH Richtlinie und stichprobenartige Erfassung der Moosflora auf Wiener Stadtgebiet“, Wien.

ZTV-ING: 2018-01 „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten“, Bundesanstalt für Straßenwesen.

Anhang

- Anhang A: Bedeutung Zeigerwerte
- Anhang B: Betonmischungsverhältnisse
- Anhang C: Konditionierung Betonproben
- Anhang D: Biegezugfestigkeit
- Anhang E: Rautiefe
- Anhang F: Kapillare Wasseraufnahme
- Anhang G: Dichte, Porosität und Wasseraufnahme
- Anhang H: Absorptionsisotherme
- Anhang I: Optisches pH-Messverfahren
- Anhang J: Bildanalyse pH-Diffusionsprüfung
- Anhang K: Mikroskopie
- Anhang L: Bildanalyse Mooswachstum
- Anhang M: Betonfeuchtigkeitsmessung Auslagerung

Anhang A: Bedeutung Zeigerwerte

Nach Landolt (Landolt u. a., 2010):

Feuchtezahl:

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
1	sehr trocken	exponierte Substrate in niederschlagsarmen Gebieten oder vor Regen geschützt
2	trocken	exponierte Substrate in wenig luftfeuchter Lage (meist Felsen) oder Erde in niederschlagsarmen Gebieten
3	frisch	mittlere Feuchtigkeitsverhältnisse
4	feucht	Substrate, die selten ganz austrocknen, aber kaum überschwemmt werden
5	nass	Substrate, die nie ganz austrocknen, aber häufig oder dauernd überschwemmt sind

Reaktionszahl:

1	sehr sauer	pH des Substrates < ca. 4, z. B. Hochmoortorf
2	sauer	pH des Substrates ca. 3.5-5, z. B. morsches Holz
3	subneutral	basenarm; pH des Substrates ca. 4.5-6.5, z. B. Silikatgestein unter Kalkeinfluss
4	± neutral	pH des Substrates ca. 6-7.5, z. B. viele Laubwald-Böden
5	basisch	pH des Substrates > ca. 7, z. B. Kalkfels

Lichtzahl:

1	sehr schattig	z. B. dunkler Nadelwald oder Höhleneingänge (nie direkte Sonnenstrahlung)
2	schattig	z. B. lockerer Laubwald oder dichte Gebüsche (direkte Besonnung relativ selten)
3	halbschattig	mittlere oder im Tagesgang stark wechselnde Lichtverhältnisse
4	hell	z. B. ost- oder westexponierte Hänge über der Waldgrenze (direkte Besonnung relativ häufig)
5	sehr hell	fast nur an südexponierten Felsen (bei schönem Wetter tagsüber dauernd von der Sonne beschienen)

Temperaturzahl:

1	alpin	und/oder nival auch kalte Kleinstandorte tieferer Lagen
2	subalpin	auch geschützte Kleinstandorte höherer Lagen
3	montan	mittlere oder im Tagesgang stark wechselnde Lichtverhältnisse
4	collin	gelegentlich an geschützten wärmeren Kleinstandorten hoch aufsteigend
5	collin	nur wärmste Stellen nur gelegentlich auch montan

Anhang A: Bedeutung Zeigerwerte

Nach Ellenberg (Ellenberg u. a., 2001):

Feuchtezahl:

(Vorkommen im Gefälle der Bodenfeuchtigkeit vom flachgründig-trockenen Fels-hang bis zum Sumpfboden sowie vom seichten bis zum tiefen Wasser)

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
1	Starktrockniszeiger	an oftmals austrocknenden Stellen lebensfähig und auf trockene Substrate beschränkt, z.B. an sonnigen Felsen
2	zwischen 1 und 3 stehend	d.h. vorwiegend an Trockenstandorten
3	Trockniszeiger	auf trockenen Böden häufiger vorkommend und zumindest an ziemlich trockenen Stellen
4	zwischen 3 und 5 stehend	mäßig frische bis länger trockenfallende Plätze; hierher besonders an Tau- und Nebelfeuchte angepaßte Moose
5	Frischezeiger	Schwergewicht auf mittelfeuchten Böden; auf nassen sowie auf öfters austrocknenden Böden fehlend; Arten, die luftfeuchte Lagen und frühjahrsfeuchte Standorte bevorzugen
6	zwischen 5 und 7 stehend	mäßig, aber dauerfeuchte Stellen besiedelnd
7	Feuchtezeiger	Schwergewicht auf gut durchfeuchteten bis vernäßten Standorten
8	zwischen 7 und 9 stehend	
9		an dauernd nassen bzw. besprühten Plätzen im Nahbereich von Gewässern und Wasserfällen sowie regelmäßig überflutete oder auch untergetauchte bzw. schwimmende Moose

Reaktionszahl:

Vorkommen im Gefälle der Bodenreaktion und des Kalkgehaltes.

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
1	Starksäurezeiger	niemals auf schwachsauren bis alkalischen Substraten, d.h. auf Rohhumus und kalkfreies, mineralisches Substrat sowie z.B. Fichtenborke beschränkt; nach Volger Anzeiger für extrem saure Standorte mit pH-Werten bis unter 3.0; niemals in den pH-Bereich „mäßig sauer“ (ab pH 5.0) eindringend
2	zwischen 1 und 3 stehend	d.h. vorwiegend auf sehr saurem Substrat
3	Säurezeiger	Schwergewicht auf sehr sauren Böden immer nährstoffarmer Standorte; nach Volger nur im stark bis sehr sauren Bereich; immer deutlich unter pH 5
4	zwischen 3 und 5 stehend	
5	Mäßigsäurezeiger	im mäßig sauren Bereich um pH 5.0 bis maximal pH 6.0 (abgeändert nach Volger)
6	zwischen 5 und 7 stehend	
7	Schwach-säure- bis Schwachbasenzeiger	niemals auf stärker sauren Substraten, kalkhold; nach Volger vorwiegend im schwach sauren Bereich um pH 6.0 bis maximal pH 6.9; noch nicht im neutralen Bereich

8	zwischen 7 und 9 stehend	
9	Basen- und Kalkzeiger	stets auf kalkreichen Böden, kalkstet; nach Volger ausschließlich im neutralen bis alkalischen Bereich um pH 7.0 und darüber

Lichtzahl:

(Vorkommen in Beziehung zur relativen Beleuchtung) Maßgebend ist für alle Arten die relative Beleuchtungsstärke, die an ihrem Wuchsort zur Zeit der vollen Belaubung der sommergrünen Pflanzen herrscht.

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
1	Tiefschattenpflanze	noch bei weniger als 1%, selten bei mehr als 30% relativer Beleuchtung vorkommend; vorwiegend in Höhlen und Halbhöhlen
2	zwischen 1 und 3 stehend	das heißt nur an Schattstandorten
3	Schattenpflanze	meist bei weniger als 5% relativer Beleuchtung; doch auch an helleren Stellen
4	zwischen 3 und 5 stehend	
5	Halbschattenpflanze	nur selten im vollen Licht; aber auch im Schatten
6	zwischen 5 und 7 stehend	
7	Halblichtpflanze	meist im vollen, indirekten Licht, aber auch noch im Schatten vorkommend
8	Lichtpflanze	nur ausnahmsweise bei weniger als 40% relativer Beleuchtung; vorwiegend an sonnigen Stellen
9	Volllichtpflanze	nur an vollbestrahlten Plätzen, nur selten bei weniger als 50% relativer Beleuchtung

Temperaturzahl:

(Vorkommen im Wärmegefälle von der alpinen Stufe zu Tieflagen bzw. von der arktischen zur mediterranen Zone; n.B.= nördliche Breite)

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
1	Kältezeiger	nur in hohen Gebirgslagen oder im boreal-arktischen Bereich; kaum bis in die obere Bergstufe herabsteigend und Hauptverbreitung in Nordeuropa; nach Norden meist bis Spitzbergen (ca. 80° n.B.)
2	zwischen 1 und 3 stehend	vorwiegend subalpine und obere montane Stufe; im Norden oft nur bis 70° n.B.
3	Kühlezeiger	seltener in subalpinen, vorwiegend in hochmontanen Lagen oder temperatboreal; nach Norden bis ca. 65° (selten bis 70°) n.B.
4	zwischen 3 und 5 stehend	(nur bis obere montane Stufe, besonders montane Arten); nach Norden bis 60° (selten bis 65°) n.B.
5	Mäßigwärmezeiger	von höher montanen bis in tiefe Lagen, Schwergewicht in submontanen Bereichen; im Norden nur selten bis 60° n.B.
6	zwischen 5 und 7 stehend	oft höchstens bis untere montane Stufe; kaum über 55° n.B. verbreitet

Anhang A: Bedeutung Zeigerwerte

7	Wärmezeiger	vorwiegend auf Hügelstufe und Ebene beschränkt und - wenn im nördlichen Mitteleuropa - nur in Tieflagen; nach Norden meist nur bis ca. 55° n.B.
8	zwischen 7 und 9 stehend	meist mit submediterranem Schwergewicht; in Mitteleuropa nur in wärmeren Lagen
9	extremer Wärmezeiger	nur ausnahmsweise als Relikt auf wärmste Plätze Mitteleuropas vom Mediterrangebiet übergreifend

Anhang B: Betonmischungsverhältnisse

Poröser UHPC

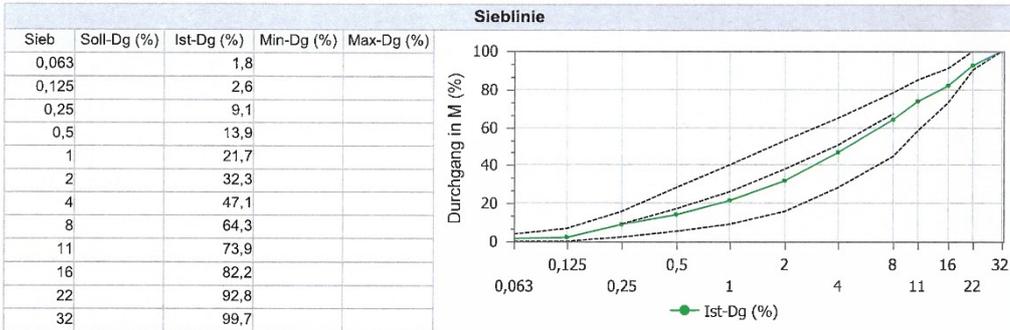
Datum	21.08.2017	Mischung		Betonsorte:	
Projekt	Serie	Rezept.Nr.		Menge	Infos
U_HPC-Hermetikplatten	BF	HR-003		1,9 [l]	W/B
		Einwaage SOLL		Einwaage IST	0,22
Bestandteile		kg		kg	kg/m ³
Cem I 52.5 N Lafarge CG (Hoang)		1,385			738,8
RW Füller Q1		0,180			96,0
QM 16900		0,388			206,9
0		0,000			0,0
0		0,000			0,0
Name Zusatzmittel		0,000			0,0
Luftporenbildner		0,000			0,0
Zugabe-Wasser		0,349			186,3
0		0,000			0,0
Geba Quarzpowder 100 - 200 µm		0,446			238,0
Dorsilit Nr. 8 (0.3 - 0.8) mm		1,250			666,5
Basalt 1/3 (Metten)		0,551			294,0
Frischbetonrohddichte		2427	kg/m ³	LP-Gehalt	0,0
Gesamtwasser		186,3	kg/m ³	W/Pm	0,15
Leimvolumen ohne Luft		640,0	l/m ³		

Normalbeton

Sortenausdruck

Werk	Sorte	Kurzbezeichnung	Bezeichnung
2710 Gratkorn	C51002150	C30/37	C30/37 XC1 F52 GK22 42,5N

Betondaten							
Betonart	Gruppe	Qualitätskontrolle	Prüfalter	Expositionsklassen			
Eigenschaften		Ja	0	XC1			
Fest-Kl	Ziel-Fest (N/mm ²)	Fest-Entw	Luftgehalt (%)	Kons-Kl	Ziel-Kons	Chlorid-Kl	Überw-Kl
C 30/37	37,0	Mittel	1,5	F52	55	Cl 0,10	
Rohd-Kl	Zielrohddichte (kg/m ³)	GK-Art	Größtkorn (mm)	Sieblinienbereich	Sieblinien-Nr	Max-Restwasser (%)	
		RK I	22	A/C	22-02	25	
Verwendung				Eigenschaften			
Nachbehandlungsdauer (Tage)	Verarbeitbarkeitszeit (h)	Min-Zement (kg/m ³)	Min-Bindemittel (kg/m ³)	Max-W/B	Betontemperatur (°C)		
	1,75				Min	Max	



Art	Nummer	Bezeichnung	Hersteller	Sollwert	Eh	Vol (m ³)	k-Wert	O-Trocken (kg/m ³)	F (%)	Wasser (kg)	Nass (kg/m ³)
GK	6402076	RK 0/4 Tieber GF85 f5 F1	TIEBER GMBH	48,00	%	0,325		878	4,80	42,1	920
GK	6423076	RK 4/16 Tieber GC85/20 f1.5 F1	TIEBER GMBH	32,00	%	0,217		585	1,50	8,8	594
GK	6452076	RK 16/32 Tieber GC85/20 f1.5 F1	TIEBER GMBH	20,00	%	0,135		367	0,50	1,8	369
GK	----	Summe	----			0,677		1830		52,8	1883
BM	10101225	CEM II A-M 42,5 N Retznei	LAFARGE RETZNEI	309,00	kg	0,100		309			309
BM	10101202	Fluamix C Retznei	LAFARGE RETZNEI	60,00	kg	0,022	0,80	60			60
ZM	21907	flow L-05	BAUSTOFFTECHNIK	0,75	%	0,003		2,77		2,0	2,77
WA	999997	Frischwasser	ROHRDORFER TRANSPORTBETON GMBH	185,00	kg	0,183		183		130,3	130

Wasser für W/B (kg/m ³)	Bindemittel für W/B (kg/m ³)	W/B	Rohddichte (kg/m ³)	Bindemittel (kg/m ³)	Leimvolumen (m ³)	Mehlkorngehalt (kg/m ³)	Mehlk-Feinstsand (kg/m ³)	Chloridgehalt (%)
183	357	0,51	2385	369	0,302	416	536	

Baustofftechnik GmbH
 Lagerstraße 1-5
 A-2103 Langenzersdorf
 Tel.: +43 50543 50000
 Fax: +43 50543 950000
 www.rohrdorfer.at

Prüfstellenleiter

Robert

Chargenprotokolle

Werk		Datum	Zeit	LS-Nr	Chp-Nr	Mandant / Betrieb	Kunde													
2710 Werk Gratkorn		01.06.2017	06:09 - 06	264850	284881	2001/28 - Lieferbeton GmbH	110225 - Technische Universität Graz													
Projekt		Baubabschnitt						Bauteil												
5439966 - 80'10 Graz Infieldgasse-45 000 78638																				
Menge	Rückmenge	Rückm LS-Nr	Mischer	Auslass	Anzahl Chargen	Fahrzeug-Nr	Kennzeichen													
1,50			1	1	1	347	GU 155HI													
Sorte		Bezeichnung		Artikel		Bezeichnung														
C5/1002150		C30/37 XC1 F52 GK22 42,5N		C51002150		C30/37 XC1 GK22 F52 42,5N														
		Expositionsklassen				Eigenschaften														
		XC1																		
Mischzeit (s)		Konsistenz		Betontemperatur (°C)		Lufttemperatur (°C)														
Soll	ist	Soll	ist	Soll	ist	Soll	ist													
25	31	55.000	335,628	15,5	19,0	1,00														
Mater-Nr/Bezeichnung		Wg	Silo	Sollwert	Eh	Abw	Eh	Istwert	Eh	Abw	Eh	Feu (%)	Abs (%)	Rondiche	Feststoff	Wa-Geh	Temp (°C)	k-Wert	ChKorr	Kennz
6402076 RK 0/4 Tieber GF85 IS F1		1	1	1316,96	kg	1376,22	kg	1377,18	kg	0,96	kg	0,07	4,50	2700	100	59,30				
6423076 RK 4/16 Tieber GC85/20 f1.5		1	6	877,97	kg	891,14	kg	890,92	kg	-0,22	kg	-0,02	1,50	2700	100	13,17				
6452076 RK 16/32 Tieber GC88/20 f1.		1	4	550,76	kg	559,03	kg	560,77	kg	1,74	kg	0,31	1,50	2710	100	8,29				
10101225 CEM II A-M 42,5 N Reiznei		2	4	463,50	kg	463,50	kg	463,18	kg	-0,32	kg	-0,07		3100	100					
10101202 Fluamix C Reiznei		2	3	90,00	kg	90,00	kg	88,83	kg	-1,17	kg	-1,30		2700	100					
21907 dynamIQ flow L-05		4	1	4,15	kg	4,15	kg	4,14	kg	-0,01	kg	-0,16		1060	25	2,93				
999997 Frischwasser		3	2	277,50	kg	170,37	kg	170,72	kg	0,36	kg	0,21		1000		170,72				
W/B		Gewicht (kg)		Rohdichte (kg/m³)		Wasser für		Wasser für		Wasser für		Wa-Absorption		Mischerleistung vor						
ist	Max	Soll	ist	Soll	ist	Soll	ist	Soll	ist	Soll	ist	Soll	ist	Soll	ist					
0,47		3 554	3 557	2 370	2 371	252,48	168,32	252,48	168,32	168,32	71,672									

Baustofftechnik GmbH
 Lagerswaße 1-5
 A-1000 Lafgenzersdorf
 Tel: +43 1 61543 50000
 Fax: +43 1 61543 50000
 www.rohrdorfer.at

Drainbeton und Substratbeton

Datum	23.04.2018	Mischung		Betonsorte:	
Projekt	Serie	Rezept.Nr.		Menge	Infos
Platten-begrünter Beton	BF	Drainbeton-300		6,2 [l]	W/B
		Einwaage SOLL		Einwaage IST	0,35
Bestandteile		kg		kg	kg/m³
CEM I 42,5 R Dyckerhoff PZ Doppel (Fa. Metten)		1,858			299,6
0		0,000			0,0
0		0,000			0,0
0		0,000			0,0
0		0,000			0,0
Name Zusatzmittel		0,000			0,0
0		0,000			0,0
Zugabe-Wasser		0,6544			105,5
0		0,000			0,0
0		0,000			0,0
0		0,000			0,0
Dorosilit 3-3,5mm		13,477			2173,7
Frischbetonrohddichte		2579 kg/m ³		LP-Gehalt	0,0
Gesamtwasser		105,5 kg/m ³		W/Pm	0,35
Leimvolumen ohne Luft		203,8 l/m ³			

Datum	26.04.2018	Mischung		Betonsorte:	
Projekt	Serie	Rezept.Nr.		Menge	Infos
Platten-begrünter Beton	BF	Drainbeton-300		30,0 [l]	W/B
		Einwaage SOLL		Einwaage IST	0,35
Bestandteile		kg		kg	kg/m³
CEM I 42,5 R Dyckerhoff PZ Doppel (Fa. Metten)		8,988			299,6
0		0,000			0,0
0		0,000			0,0
0		0,000			0,0
0		0,000			0,0
Name Zusatzmittel		0,000			0,0
0		0,000			0,0
Zugabe-Wasser		3,1664			105,5
0		0,000			0,0
0		0,000			0,0
0		0,000			0,0
Dorosilit 3-3,5mm		65,211			2173,7
Frischbetonrohddichte		2579 kg/m ³		LP-Gehalt	0,0
Gesamtwasser		105,5 kg/m ³		W/Pm	0,35
Leimvolumen ohne Luft		203,8 l/m ³			

Anhang C: Konditionierung Betonproben

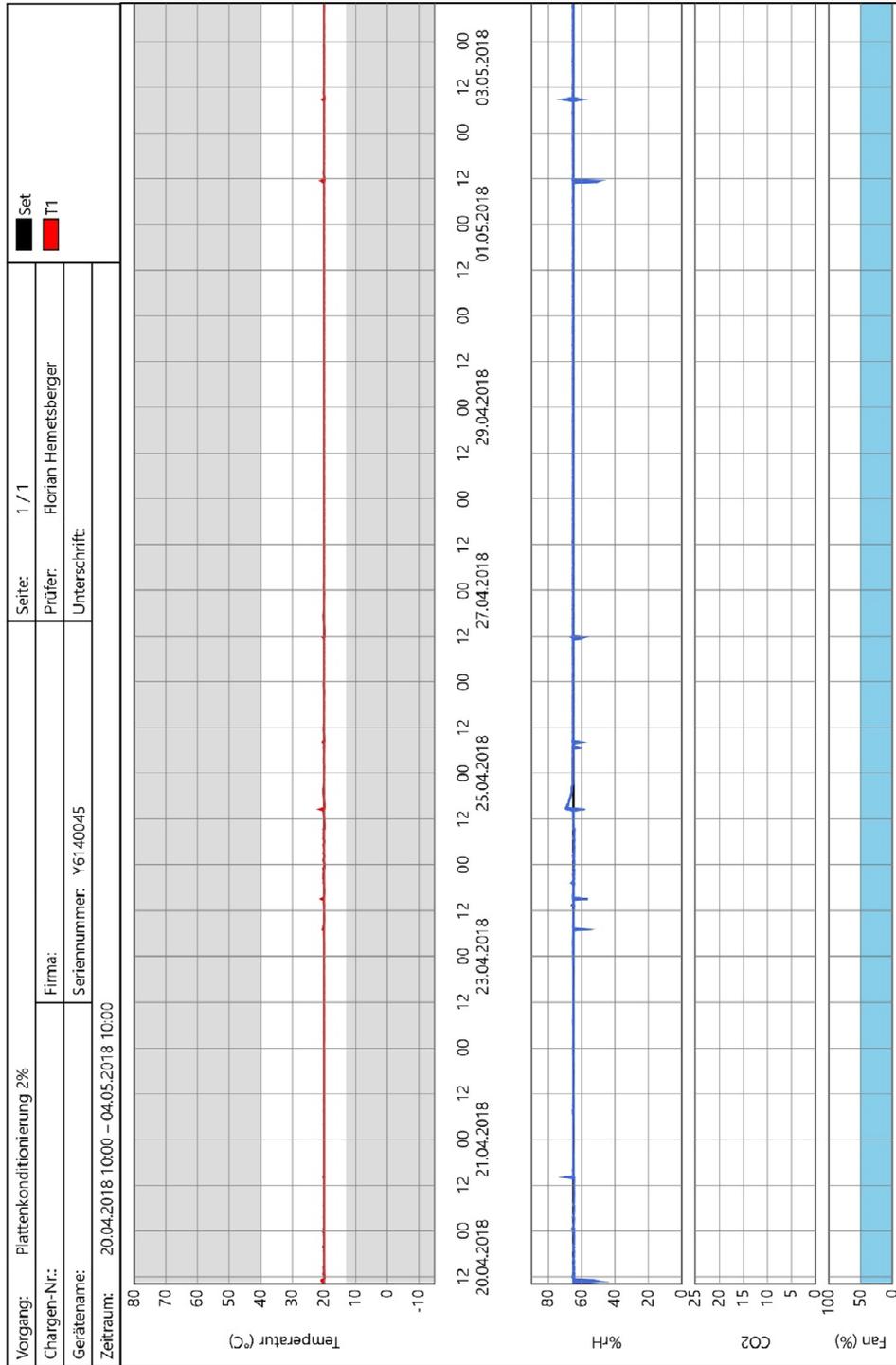
Konditionierungsliste

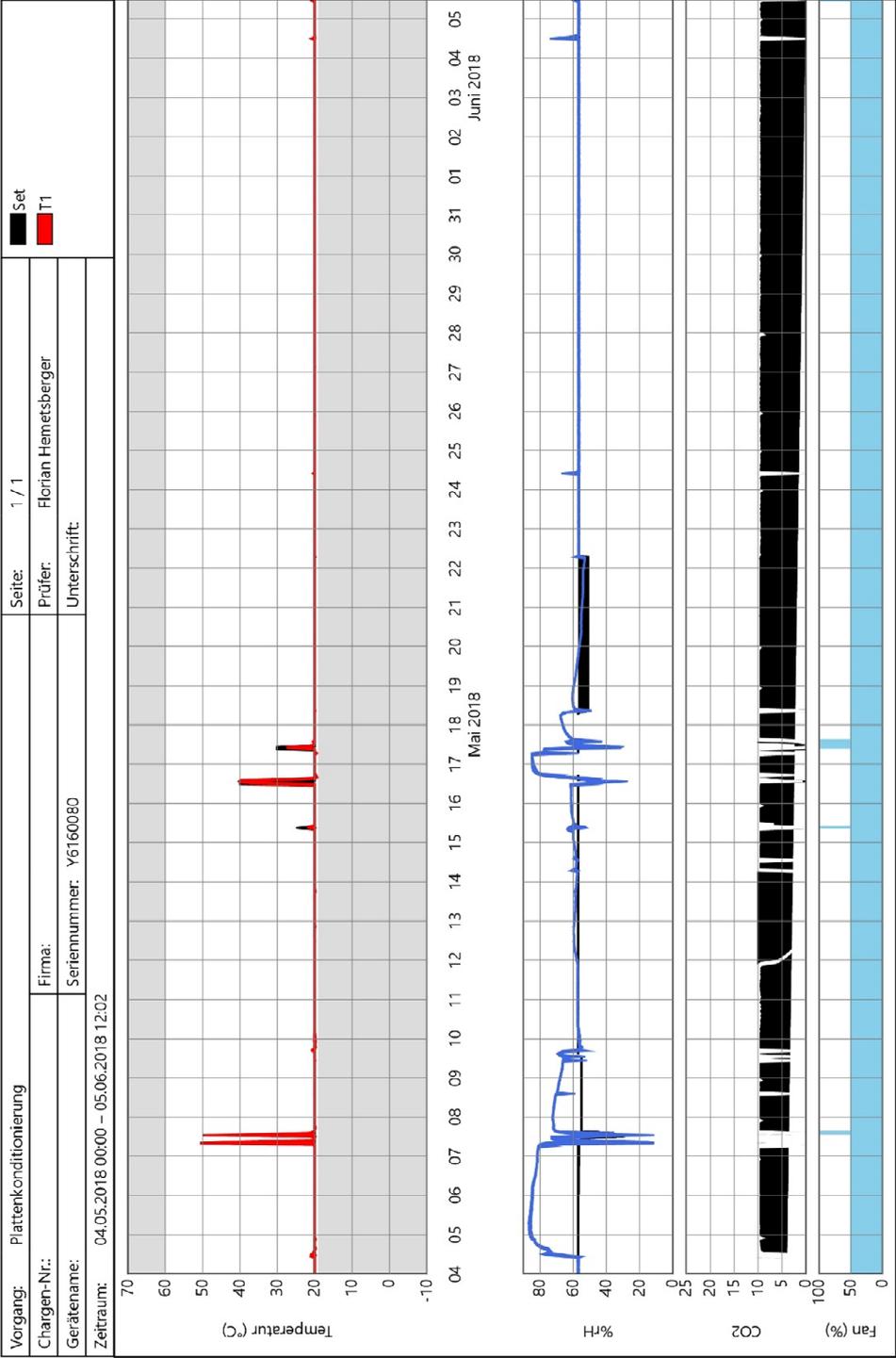
Behandlung und Lagerung	Bezeichnung	Herstellungsdatum	Menge in Stk.	Konditionierung (20°C)				Außenlagerung			
				65% rel. F.; 2,00% CO ₂	65% rel. F.; 0,04% CO ₂	90% rel. F.; 0,04% CO ₂	57% rel. F.; 10,00% CO ₂				
UHPC:											
Karbonatisiert	Schattige Lagerung	U _{SCH} -1-K-2017.08.22	22.08.2017	1	20.04.-03.05.			03.05.2018			
		U _{SCH} -2-K-2017.08.22	22.08.2017	1	20.04.-03.05.			03.05.2018			
		U _{SCH} -3-K-2017.08.22	22.08.2017	1	20.04.-03.05.			03.05.2018			
	Sonnige Lagerung	U _{SO} -1-K-2017.08.22	22.08.2017	1	20.04.-03.05.			03.05.2018			
		U _{SO} -2-K-2017.08.22	22.08.2017	1	20.04.-03.05.			03.05.2018			
		U _{SO} -3-K-2017.08.22	22.08.2017	1	20.04.-03.05.			03.05.2018			
Versuchspröben	U-5-K-2017.08.22	22.08.2017	3	24.04.-07.05.	07.05.-14.06.						
Normalbeton											
Nicht karbonatisiert	Schattige Lagerung	N _{SCH} -1-2017.06.01	01.06.2017	1		26.04.-03.05.		03.05.2018			
		N _{SCH} -2-2017.06.01	01.06.2017	1		26.04.-03.05.		03.05.2018			
		N _{SCH} -3-2017.06.01	01.06.2017	1		26.04.-03.05.		03.05.2018			
		N _{SCH} -4-2017.06.01	01.06.2017	1		26.04.-03.05.		03.05.2018			
		N _{SCH} -5-2018.05.03	03.05.2018	1				03.05.2018			
		N _{SCH} -6-2018.05.03	03.05.2018	1				03.05.2018			
	Sonnige Lagerung	N _{SO} -1-2017.06.01	01.06.2017	1		26.04.-03.05.		03.05.2018			
		N _{SO} -2-2017.06.01	01.06.2017	1		26.04.-03.05.		03.05.2018			
		N _{SO} -3-2017.06.01	01.06.2017	1		26.04.-03.05.		03.05.2018			
		N _{SO} -4-2017.06.01	01.06.2017	1		26.04.-03.05.		03.05.2018			
		N _{SO} -5-2018.05.03	03.05.2018	1				03.05.2018			
		N _{SO} -6-2018.05.03	03.05.2018	1				03.05.2018			
		Karbonatisiert	Schattige Lagerung	N _{SCH} -1-K-2017.06.01	01.06.2017	1	25.04.-04.05.		24.04.-25.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018
				N _{SCH} -2-K-2017.06.01	01.06.2017	1	25.04.-04.05.		24.04.-25.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018
N _{SCH} -3-K-2017.06.01	01.06.2017			1	25.04.-04.05.		24.04.-25.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018		
N _{SCH} -4-K-2017.06.01	01.06.2017			1	25.04.-04.05.		24.04.-25.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018		
Sonnige Lagerung	N _{SO} -1-K-2017.06.01		01.06.2017	1	25.04.-04.05.		24.04.-25.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018		
	N _{SO} -2-K-2017.06.01		01.06.2017	1	25.04.-04.05.		24.04.-25.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018		
	N _{SO} -3-K-2017.06.01		01.06.2017	1	25.04.-04.05.		24.04.-25.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018		
	N _{SO} -4-K-2017.06.01		01.06.2017	1	25.04.-04.05.		24.04.-25.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018		
	Versuchspröben		N-5-2017.06.01	01.06.2017	1		24.04.-14.06.				
	N-5-k-2017.06.01		01.06.2017	4	25.04.-04.05.	04.05.-14.06.	24.04.-25.04.				
Drainbeton											
Nicht karbonatisiert	Schattige Lagerung	D _{SCH} -1-2018.04.23	23.04.2018	1		25.04.-03.05.		23.04.-25.04.	03.05.2018		
		D _{SCH} -2-2018.04.23	23.04.2018	1		25.04.-03.05.		23.04.-25.04.	03.05.2018		
		D _{SCH} -3-2018.04.23	23.04.2018	1		25.04.-03.05.		23.04.-25.04.	03.05.2018		
		D _{SCH} -4-2018.04.23	23.04.2018	1		25.04.-03.05.		23.04.-25.04.	03.05.2018		
	Sonnige Lagerung	D _{SO} -1-2018.04.23	23.04.2018	1		25.04.-03.05.		23.04.-25.04.	03.05.2018		
		D _{SO} -2-2018.04.23	23.04.2018	1		25.04.-03.05.		23.04.-25.04.	03.05.2018		
		D _{SO} -3-2018.04.23	23.04.2018	1		25.04.-03.05.		23.04.-25.04.	03.05.2018		
		D _{SO} -4-2018.04.23	23.04.2018	1		25.04.-03.05.		23.04.-25.04.	03.05.2018		
Karbonatisiert	Schattige Lagerung	D _{SCH} -1-K-2018.04.26	26.04.2018	1		26.04.-04.05.		26.04.-27.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018	
		D _{SCH} -2-K-2018.04.26	26.04.2018	1		26.04.-04.05.		26.04.-27.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018	
		D _{SCH} -3-K-2018.04.26	26.04.2018	1		26.04.-04.05.		26.04.-27.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018	
		D _{SCH} -4-K-2018.04.26	26.04.2018	1		26.04.-04.05.		26.04.-27.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018	
	Sonnige Lagerung	D _{SO} -1-K-2018.04.26	26.04.2018	1		26.04.-04.05.		26.04.-27.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018	
		D _{SO} -2-K-2018.04.26	26.04.2018	1		26.04.-04.05.		26.04.-27.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018	
		D _{SO} -3-K-2018.04.26	26.04.2018	1		26.04.-04.05.		26.04.-27.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018	
		D _{SO} -4-K-2018.04.26	26.04.2018	1		26.04.-04.05.		26.04.-27.04.	04.05.-05.06.	05.06.2018	

Anhang C: Konditionierung Betonproben

Behandlung und Lagerung	Bezeichnung	Herstellungsdatum	Menge in Stk.	Konditionierung (20°C)				Außenlagerung
				65% rel. F.;	65% rel. F.;	90% rel. F.;	57% rel. F.;	
Substratbeon								
Karbonatisiert	Schattige Lagerung	S _{SCH} -1-K-2018.04.26	26.04.2018	1	27.04.-04.05., 24.05.-05.06.	26.04.-27.04.	04.05.-24.05.	05.06.2018
		S _{SCH} -2-K-2018.04.26	26.04.2018	1	27.04.-04.05., 24.05.-05.06.	26.04.-27.04.	04.05.-24.05.	05.06.2018
		S _{SCH} -3-K-2018.04.26	26.04.2018	1	27.04.-04.05., 24.05.-05.06.	26.04.-27.04.	04.05.-24.05.	05.06.2018
		S _{SCH} -4-K-2018.04.26	26.04.2018	1	27.04.-04.05., 24.05.-05.06.	26.04.-27.04.	04.05.-24.05.	05.06.2018
	Sonnige Lagerung	S _{SO} -1-K-2018.04.26	26.04.2018	1	27.04.-04.05., 24.05.-05.06.	26.04.-27.04.	04.05.-24.05.	05.06.2018
		S _{SO} -2-K-2018.04.26	26.04.2018	1	27.04.-04.05., 24.05.-05.06.	26.04.-27.04.	04.05.-24.05.	05.06.2018
		S _{SO} -3-K-2018.04.26	26.04.2018	1	27.04.-04.05., 24.05.-05.06.	26.04.-27.04.	04.05.-24.05.	05.06.2018
		S _{SO} -4-K-2018.04.26	26.04.2018	1	27.04.-04.05., 24.05.-05.06.	26.04.-27.04.	04.05.-24.05.	05.06.2018
Versuchsproben (D+S)	D-5-2018.04.23	23.04.2018	10	25.04.-14.06.	23.04-25.04.			
	D-5-2018.04.26	26.04.2018	6	27.04.-04.05., 24.05.-05.06.	26.04.-27.04.	04.05.-24.05.		
	D-5-2018.04.26	26.04.2018	7	26.04.-14.06.				

Memmert Universalschrank





Anhang D: Biegezugfestigkeit

LABORPROTOKOLL										
24.05.2018										
Bestimmung der Abmessungen des Plattentyps nach Anhang C, EN 1339, Seite 30										
Durchgeführt durch: Florian Hemetsberger										
Datum: 24.05.2018										
Proben-Nr.			D-5-1	D-5-2	D-5-3	N-5-1	UHPC (Werte der Prüfung 2017-08-30)			
Masse	lufttrocken	kg	4,7777	4,7664	4,7877	1,7195	4,8127	4,7102	5,116	
Aussehen	siehe Anhang J Seite 56 bzw. 5.4.1 Seite 14									
Oberflächenstruktur	siehe Anhang J u. 5.4.2									
Farbe	siehe Anhang J u. 5.4.3 (Vergleich mit Muster?) gibt's Farbumterschiede bei den angelieferten Proben??									
Länge	siehe: C.2.2	L1	mm	251,24	251,89	251,13	150,78	250,6	250,56	250,72
		L2	mm	251,1	251,05	250,46	151,34	250,55	250,61	250,42
		samt Noppen, falls vorhanden	mm						250,58	
Breite	siehe: C.2.2, Seite 30	1. Messung	mm	251,11	250,6	251,59	157,7	250,5	250,28	250,88
		2. Messung	mm	250,63	250,99	252,2	157,32	250,35	250,24	250,55
		samt Noppen, falls vorhanden	mm							
Dicke	siehe: C.3.2, Seite 30	1. Messung	mm	40,68	40,63	40,18	30,8	36,22	36,3	36,53
		2. Messung	mm	40,73	40,05	40,9	31,87	36,02	35,7	35,57
		3. Messung	mm	40,99	40,26	40,75	31,82	35,83	35,97	36,36
		4. Messung	mm	39,17	40,18	39,95	30,94	36,13	36,17	36,09

Bestimmung der Platten-Biegefestigkeit nach EN 1339:2003 (D) + AC:2006 (D), Anhang F.3									
Durchgeführt durch: Florian Hemetsberger									
Datum: 24.05.2018									
Proben-Nr.			D-5-1	D-5-2	D-5-3	N-5-1	UHPC (Werte der Prüfung 2017-08-30)		
Bruchlast		kN	4,438	4,788	4,725	7,2	7,788	9,5	7,875
	Auflagerabstand	mm	200	200	200	100	200	200	200
Bruchquerschnitt	Höhe linker Probenrand	mm	40,51	40,23	40,71	31,39	30,39	30	30,84
	Höhe Probenmitte	mm	40,58	40,53	40,67	31,7	30,5	30	31,03
	Höhe rechter Probenrand	mm	40,51	40,5	40,86	30,99	30,04	30	30,65
	Breite unten	mm	250,99	250,21	250,32	150,96	250,27	250	250,92
	Breite oben	mm	251,8	250,81	250,95	151,24	250,21	250	250,94
Biegezugfestigkeit		N/mm ²	3,22	3,51	3,41	7,27	10,16	12,67	9,90
			Drainbeton				Normalbeton	UHPC	
Standardabweichung		N/mm ²	0,14				0,00	1,53	
Mittelwert Biegezugfestigkeit		N/mm ²	3,38				7,27	10,91	

Anhang E: Rautiefe

Bestimmung der Rautiefe						
Durchgeführt durch:		Florian Hemetsberger				
Datum	Geprüfter Beton	Gemessener Durchmesser [cm]	Verwendetes Messvolumen [cm ³]	Einzelwert der Rautiefe [mm]	Mittlere Rautiefe [mm]	Standardabweichung [mm]
23.06.2018	UHPC	22,9	30	0,728	0,762	0,025
23.06.2018	UHPC	22,3	30	0,768		
23.06.2018	UHPC	22	30	0,789		
23.06.2018	Normalbeton	19,2	30	1,036	0,992	0,037
23.06.2018	Normalbeton	20,1	30	0,945		
23.06.2018	Normalbeton	19,6	30	0,994		
23.06.2018	Drainbeton	18,3	40	1,521	1,473	0,046
23.06.2018	Drainbeton	19	40	1,411		
23.06.2018	Drainbeton	18,5	40	1,488		
23.06.2018	Substratbeton	18,5	40	1,488	1,422	0,050
23.06.2018	Substratbeton	19,3	40	1,367		
23.06.2018	Substratbeton	19	40	1,411		

Anhang F: Kapillare Wasseraufnahme

Trocknung zur Massekonstanz

Trocknung zur Massekonstanz		durchgeführt: Florian Hemetsberger																
Datum	15.06.2018	18.06.2018	19.06.2018	Δm	20.06.2018	Δm	21.06.2018	Δm	23.06.2018	Δm	24.06.2018	Δm	25.06.2018	Δm	26.06.2018	Δm		
		gemessene Masse [g]																
Probe	Einlagerung bei 70°C	KWU1	179,2	178,9	0,3	178,4	0,5	178,0	0,4			177,5	0,5	177,5	0,0	177,4	0,1	
		KWU2	177,6	177,2	0,4	176,8	0,4	176,5	0,3			176,1	0,4	175,8	0,3	175,7	0,1	
		KWU3	178,5	177,9	0,6	177,5	0,4	177,2	0,3			176,6	0,6	176,3	0,3	176,3	0	
		KWU4	175,4	175,0	0,4	174,5	0,5	174,2	0,3			173,8	0,4	173,5	0,3	173,4	0,1	
		KWU5	167,4	166,9	0,5	166,5	0,4	166,2	0,3			165,8	0,4	165,5	0,3	165,4	0,1	
		KWU6	175,4	174,9	0,5	174,5	0,4	174,1	0,4			173,5	0,6	173,3	0,2	173,2	0,1	
		KWU7	175,0	174,6	0,4	174,2	0,4	173,9	0,3			173,2	0,7	172,9	0,3	172,9	0	
		KWN1	173,3	173,1	0,2	172,8	0,3	172,7	0,1	172,6	0,1							
		KWN2	181,4	181,2	0,2	181,1	0,1	180,9	0,2	180,9	0,0							
		KWN3	168,8	168,6	0,2	168,2	0,4	168,0	0,2	167,9	0,1							
		KWN4	177,0	176,8	0,2	176,6	0,2	176,4	0,2	176,4	0,0							
		KWN5	183,9	183,7	0,2	183,4	0,3	183,4	0,0	183,3	0,1							
		KWN6	180,3	180,0	0,3	179,8	0,2	179,6	0,2	179,5	0,1							
		KWN7	176,2	176,0	0,2	175,5	0,5	175,5	0,0	175,4	0,1							
		KWD1	189,4	189,4	0,0	189,3	0,1	189,2	0,1			189,3	-0,1					
		KWD2	181,5	181,5	0,0	181,5	0,0	181,4	0,1			181,5	-0,1					
		KWD3	188,4	188,4	0,0	188,3	0,1	188,3	0,0			188,4	-0,1					
		KWD4	190,8	190,8	0,0	190,7	0,1	190,7	0,0			190,7	0,0					
		KWD5	185,3	185,2	0,1	185,0	0,2	185,0	0,0			185,0	0,0					
		KWD6	190,8	190,8	0,0	190,5	0,3	190,5	0,0			190,5	0,0					
		KWD7	200,7	200,7	0,0	200,4	0,3	200,4	0,0			200,5	-0,1					
		KWS1	207,0	207,0	0,0	206,7	0,3	206,7	0,0			207,0	-0,3	206,9	0,1			
		KWS2	204,0	204,0	0,0	204,0	0,0	204,0	0,0			203,9	0,1	203,9	0,0			
		KWS3	200,5	200,4	0,1	200,3	0,1	200,3	0,0			200,4	-0,1	200,4	0,0			
		KWS4	203,8	203,8	0,0	203,6	0,2	203,6	0,0			203,7	-0,1	203,6	0,1			
		KWS5	199,8	199,7	0,1	199,6	0,1	199,6	0,0			199,6	0,0	199,6	0,0			
		KWS6	195,3	195,2	0,1	195,1	0,1	195,1	0,0			195,1	0,0	195,1	0,0			
		KWS7	196,0	195,9	0,1	195,8	0,1	195,7	0,1			195,8	-0,1	195,8	0,0			

Wasseraufnahmekoeffizient poröser UHPC

Wasseraufnahmekoeffizient UHPC			Prüfkörper						
			KW _{U1}	KW _{U2}	KW _{U3}	KW _{U4}	KW _{U5}	KW _{U6}	KW _{U7}
Länge	<i>l</i>	[mm]	50,70	50,41	50,37	50,03	49,65	50,52	49,37
Breite	<i>b</i>	[mm]	50,11	50,07	50,15	50,38	49,03	50,60	50,29
Dicke	<i>d</i>	[mm]	31,75	31,50	31,21	31,16	31,06	31,04	31,47
Masse	<i>m_t</i>	[g]	177,40	175,70	176,30	173,40	165,40	173,20	172,90
Dichte	<i>ρ₀</i>	[g/cm ³]	2,20	2,21	2,24	2,21	2,19	2,18	2,21
Lagerung 5 min	<i>m₅</i>	[g]	178,20	176,80	178,00	175,10	167,40	175,00	174,30
	Δm_5	[g/m ²]	314,89	435,85	673,05	674,53	821,66	704,21	563,93
Lagerung 20	<i>m₂₀</i>	[g]	178,90	177,40	178,80	176,10	168,80	176,10	175,00
	Δm_{20}	[g/m ²]	590,42	673,59	989,78	1071,32	1396,82	1134,56	845,90
Lagerung 1 h	<i>m₁</i>	[g]	179,40	178,10	179,80	177,20	170,20	177,30	175,80
	Δm_1	[g/m ²]	787,22	950,96	1385,70	1507,78	1971,99	1604,03	1168,15
Lagerung 2 h	<i>m₂</i>	[g]	179,70	178,40	180,60	178,10	171,60	178,20	176,40
	Δm_2	[g/m ²]	905,31	1069,83	1702,43	1864,89	2547,15	1956,14	1409,83
Lagerung 4 h	<i>m₄</i>	[g]	180,10	179,10	181,60	179,50	173,20	179,70	177,30
	Δm_4	[g/m ²]	1062,75	1347,19	2098,34	2420,38	3204,48	2542,98	1772,36
Lagerung 8 h	<i>m₈</i>	[g]	180,40	179,60	182,80	181,00	174,10	181,10	178,20
	Δm_8	[g/m ²]	1180,83	1545,30	2573,44	3015,56	3574,22	3090,69	2134,89
Lagerung 21 h	<i>m₂₁</i>	[g]	181,10	180,80	184,50	182,20	174,50	182,40	179,90
	Δm_{21}	[g/m ²]	1456,36	2020,78	3246,49	3491,70	3738,56	3599,29	2819,66
Lagerung 24 h	<i>m₂₄</i>	[g]	181,40	181,10	184,70	182,30	174,70	182,80	180,40
	Δm_{24}	[g/m ²]	1574,45	2139,65	3325,67	3531,38	3820,72	3755,78	3021,07
			Prüfer: Florian Hemetsberger			Datum: 26.06.2018			

Wasseraufnahmekoeffizient Normalbeton

Wasseraufnahmekoeffizient Normalbeton			Prüfkörper						
			KW _{N1}	KW _{N2}	KW _{N3}	KW _{N4}	KW _{N5}	KW _{N6}	KW _{N7}
Länge [mm]	l	[mm]	49,99	50,44	50,32	50,11	50,87	50,25	50,13
Breite [mm]	b	[mm]	50,16	50,55	50,68	50,39	50,88	50,83	50,76
Dicke [mm]	d	[mm]	31,13	31,01	29,90	29,77	31,63	32,15	30,87
Masse [g]	m_t	[g]	172,60	180,90	167,90	176,40	183,30	179,50	175,40
Dichte [g/mm ³]	ρ_0	[g/cm ³]	2,21	2,29	2,20	2,35	2,24	2,19	2,23
Lagerung 5 min	m_5	[g]	173,50	181,70	168,90	177,30	184,10	180,40	176,40
	Δm_5	[g/m ²]	358,96	313,79	392,20	356,50	309,15	352,36	393,03
Lagerung 20	m_{20}	[g]	174,10	182,50	169,70	178,00	184,70	181,20	177,20
	Δm_{20}	[g/m ²]	598,27	627,58	705,96	633,78	541,01	665,57	707,45
Lagerung 1 h	m_1	[g]	174,80	183,30	170,60	178,70	185,20	182,00	177,80
	Δm_1	[g/m ²]	877,46	941,37	1058,94	911,06	734,23	978,78	943,27
Lagerung 2 h	m_2	[g]	175,40	184,00	171,40	179,20	186,10	182,70	178,50
	Δm_2	[g/m ²]	1116,76	1215,93	1372,70	1109,11	1082,02	1252,83	1218,39
Lagerung 4 h	m_4	[g]	176,20	184,50	172,30	179,70	186,50	183,50	179,10
	Δm_4	[g/m ²]	1435,84	1412,05	1725,68	1307,17	1236,59	1566,04	1454,21
Lagerung 8 h	m_8	[g]	177,10	185,30	173,40	180,60	187,70	184,70	180,40
	Δm_8	[g/m ²]	1794,80	1725,84	2157,11	1663,67	1700,31	2035,86	1965,14
Lagerung 24 h	m_{24}	[g]	178,80	186,30	174,80	181,40	188,80	185,90	181,50
	Δm_{24}	[g/m ²]	2472,83	2118,07	2706,19	1980,56	2125,39	2505,67	2397,47
			Prüfer: Florian Hemetsberger				Datum: 22.06.2018		

Anhang F: Kapillare Wasseraufnahme

Wasseraufnahmekoeffizient Drainbeton

Wasseraufnahmekoeffizient Drainbeton			Prüfkörper						
			KW _{D1}	KW _{D2}	KW _{D3}	KW _{D4}	KW _{D5}	KW _{D6}	KW _{D7}
Länge	l	[mm]	50,60	51,03	50,29	50,15	50,71	50,47	52,55
Breite	b	[mm]	50,30	50,28	50,46	51,11	50,71	50,17	51,29
Dicke	d	[mm]	40,47	40,52	41,04	40,72	40,85	41,15	40,93
Masse	m_t	[g]	189,30	181,50	188,40	190,70	185,00	190,50	200,50
Dichte	ρ_0	[g/cm ³]	1,84	1,75	1,81	1,83	1,76	1,83	1,82
Lagerung 2 min	m_2	[g]	201,10	194,70	200,80	203,80	197,70	203,20	213,90
	Δm_2	[g/m ²]	4636,21	5144,62	4886,93	5110,87	4939,23	5016,14	4972,11
Lagerung 5 min	m_5	[g]	201,80	195,50	202,30	205,00	199,00	204,70	214,90
	Δm_5	[g/m ²]	4911,24	5456,41	5478,09	5579,04	5444,82	5608,59	5343,16
Lagerung 8 min	m_8	[g]	202,40	195,60	202,50	205,50	199,20	204,90	214,60
	Δm_8	[g/m ²]	5146,98	5495,39	5556,91	5774,11	5522,60	5687,59	5231,85
Lagerung 10 min	m_{10}	[g]	202,40	195,60	202,00	205,30	199,30	204,70	214,30
	Δm_{10}	[g/m ²]	5146,98	5495,39	5359,86	5696,08	5561,50	5608,59	5120,53
Lagerung 15 min	m_{15}	[g]	202,60	196,00	203,20	206,00	199,60	204,60	214,50
	Δm_{15}	[g/m ²]	5225,56	5651,28	5832,79	5969,18	5678,17	5569,10	5194,74
Lagerung 20 min	m_{20}	[g]	203,40	196,10	202,70	205,50	199,30	204,50	214,50
	Δm_{20}	[g/m ²]	5539,88	5690,26	5635,73	5774,11	5561,50	5529,60	5194,74
Lagerung 1 h	m_1	[g]	202,10	195,30	202,10	205,20	199,10	204,00	214,30
	Δm_1	[g/m ²]	5029,11	5378,46	5399,27	5657,07	5483,71	5332,11	5120,53
Lagerung 2 h	m_2	[g]	202,20	195,60	202,00	204,90	199,10	204,40	214,40
	Δm_2	[g/m ²]	5068,40	5495,39	5359,86	5540,02	5483,71	5490,10	5157,64
Lagerung 4 h	m_4	[g]	202,70	195,50	201,90	204,80	198,90	204,10	214,30
	Δm_4	[g/m ²]	5264,85	5456,41	5320,45	5501,01	5405,93	5371,61	5120,53
Lagerung 8 h	m_8	[g]	202,30	195,10	201,80	204,60	198,60	203,70	214,50
	Δm_8	[g/m ²]	5107,69	5300,52	5281,04	5422,98	5289,26	5213,62	5194,74
Lagerung 21 h	m_{21}	[g]	202,50	196,40	203,00	206,00	199,10	204,50	214,90
	Δm_{21}	[g/m ²]	5186,27	5807,18	5753,96	5969,18	5483,71	5529,60	5343,16
Lagerung 24 h	m_{24}	[g]	202,60	195,10	202,20	205,10	199,10	204,20	214,60
	Δm_{24}	[g/m ²]	5225,56	5300,52	5438,68	5618,05	5483,71	5411,11	5231,85
			Prüfer: Florian Hemetsberger				Datum: 24.06.2018		

Wasseraufnahmekoeffizient Substratbeton

Wasseraufnahmekoeffizient Substratbeton			Prüfkörper						
			KW _{S1}	KW _{S2}	KW _{S3}	KW _{S4}	KW _{S5}	KW _{S6}	KW _{S7}
Länge	l	[mm]	50,65	52,42	52,17	52,54	51,62	50,96	50,77
Breite	b	[mm]	52,47	51,98	50,93	50,75	52,48	51,11	50,84
Dicke	d	[mm]	41,25	40,76	40,90	41,30	40,89	41,11	41,00
Masse	m_t	[g]	206,90	203,90	200,40	203,60	199,60	195,10	195,80
Dichte	ρ_0	[g/cm ³]	1,89	1,84	1,84	1,85	1,80	1,82	1,85
Lagerung 2 min	m_2	[g]	219,30	217,50	214,00	217,40	213,40	209,00	209,50
	Δm_2	[g/m ²]	4666,31	4992,16	5119,51	5176,00	5094,59	5336,78	5308,24
Lagerung 5 min	m_5	[g]	219,70	217,70	214,50	218,00	213,70	209,40	209,90
	Δm_5	[g/m ²]	4816,84	5065,58	5307,73	5401,04	5205,34	5490,36	5463,23
Lagerung 8 min	m_8	[g]	220,00	218,10	215,00	218,20	213,80	209,90	210,10
	Δm_8	[g/m ²]	4929,74	5212,41	5495,95	5476,06	5242,26	5682,33	5540,72
Lagerung 10 min	m_{10}	[g]	220,30	218,00	215,10	218,30	214,20	210,10	210,30
	Δm_{10}	[g/m ²]	5042,63	5175,70	5533,59	5513,57	5389,93	5759,12	5618,21
Lagerung 15 min	m_{15}	[g]	220,30	217,90	215,10	218,30	214,00	209,70	210,10
	Δm_{15}	[g/m ²]	5042,63	5138,99	5533,59	5513,57	5316,10	5605,54	5540,72
Lagerung 20 min	m_{20}	[g]	220,60	218,10	215,40	218,60	214,50	210,20	210,30
	Δm_{20}	[g/m ²]	5155,53	5212,41	5646,52	5626,09	5500,68	5797,51	5618,21
Lagerung 1 h	m_1	[g]	220,80	218,40	215,60	218,70	214,40	209,80	210,30
	Δm_1	[g/m ²]	5230,79	5322,53	5721,81	5663,59	5463,76	5643,94	5618,21
Lagerung 2 h	m_2	[g]	220,90	218,00	215,00	218,40	214,20	209,60	209,50
	Δm_2	[g/m ²]	5268,42	5175,70	5495,95	5551,07	5389,93	5567,15	5308,24
Lagerung 4 h	m_4	[g]	220,60	218,20	214,80	218,10	214,50	209,60	209,30
	Δm_4	[g/m ²]	5155,53	5249,11	5420,66	5438,55	5500,68	5567,15	5230,75
Lagerung 8 h	m_8	[g]	221,10	218,60	215,10	218,40	214,60	209,70	209,30
	Δm_8	[g/m ²]	5343,68	5395,94	5533,59	5551,07	5537,60	5605,54	5230,75
Lagerung 21 h	m_{21}	[g]	221,00	218,50	215,20	218,50	214,40	209,70	209,30
	Δm_{21}	[g/m ²]	5306,05	5359,23	5571,23	5588,58	5463,76	5605,54	5230,75
Lagerung 24 h	m_{24}	[g]	220,80	218,30	214,90	218,30	214,20	209,20	209,70
	Δm_{24}	[g/m ²]	5230,79	5285,82	5458,30	5513,57	5389,93	5413,57	5385,73
			Prüfer: Florian Hemetsberger				Datum: 25.06.2018		

Anhang G: Dichte, Porosität und Wasseraufnahme

Trocknung zur Massekonstanz

Trocknung zur Massekonstanz		durchgeführt: Florian Hemetsberger																			
Datum		23.06.2018	26.06.2018	28.06.2018	02.07.2018	Δm	03.07.2018	Δm	04.07.2018	Δm	06.07.2018	Δm	09.07.2018	Δm	10.07.2018	Δm	11.07.2018	Δm			
		gemessene Masse [g]																			
Probe	Einlagerung bei 70°C	KWU1		177,40		177,70	-0,30			177,59	0,11	177,32	0,27	177,39	-0,07						
		KWU2		175,70		176,20	-0,50			175,95	0,25	175,54	0,41	175,58	-0,04						
		KWU3		176,30		177,50	-1,20			177,04	0,46	176,53	0,51	176,56	-0,03						
		KWU4		173,40		174,50	-1,10			174,13	0,37	173,61	0,52	173,65	-0,04						
		KWU5		165,40		166,60	-1,20			166,12	0,48	165,65	0,47	165,71	-0,06						
		KWU6		173,20		174,50	-1,30			174,04	0,46	173,47	0,57	173,5	-0,03						
		KWU7		172,90		174,20	-1,30			173,61	0,59	173,04	0,57	173,04	0						
		KWN1		172,60			172,40	0,20	172,44	-0,04	172,46	-0,02									
		KWN2		180,90			180,60	0,30	180,71	-0,11	180,72	-0,01									
		KWN3		167,90			167,40	0,50	167,42	-0,02	167,43	-0,01									
		KWN4		176,40			176,10	0,30	176,20	-0,10	176,19	0,01									
		KWN5		183,30			183,00	0,30	183,10	-0,10	183,11	-0,01									
		KWN6		179,50			179,30	0,20	179,34	-0,04	179,35	-0,01									
		KWN7		175,40			175,10	0,30	175,18	-0,08	175,2	-0,02									
		KWD1				189,40		189,42	-0,02						189,18	0,24	189,1	0,08			
		KWD2				181,60		181,62	-0,02						181,25	0,37	181,19	0,06			
		KWD3				188,30		188,39	-0,09						188,2	0,19	188,13	0,07			
		KWD4				190,90		190,92	-0,02						190,66	0,26	190,59	0,07			
		KWD5				185,10		185,20	-0,10						184,88	0,32	184,83	0,05			
		KWD6				190,80		190,81	-0,01						190,54	0,27	190,47	0,07			
		KWD7				200,70		200,74	-0,04						200,44	0,30	200,36	0,08			
		KWS1				206,80		206,81	-0,01						206,61	0,20	206,49	0,12	206,48	0,01	
		KWS2				204,00		203,94	0,06						203,47	0,47	203,38	0,09	203,35	0,03	
		KWS3				200,40		200,34	0,06						199,94	0,40	199,83	0,11	199,82	0,01	
		KWS4				203,60		203,74	-0,14						203,41	0,33	203,31	0,1	203,31	0	
		KWS5				199,60		199,59	0,01						198,97	0,62	198,89	0,08	198,89	0	
		KWS6				195,10		195,17	-0,07						194,78	0,39	194,67	0,11	194,66	0,01	
		KWS7				195,80		195,84	-0,04						195,63	0,21	195,54	0,09	195,54	0	

UHPC											
Probe Nr											
Beschreibung:		1	2	3	4	5	6	7	MW	STABW	Varianz
Trockenmasse m_0	[g]	177,32	175,54	176,53	173,61	165,65	173,47	173,04			
Trockenmasse m_d	[g]	177,39	175,58	176,56	173,65	165,71	173,5	173,04			
Massendifferenz	[%]	-0,04	-0,02	-0,02	-0,02	-0,04	-0,02	0,00			
Masse unter Wasser m_h	[g]	111,4	110,2	110,9	109,0	103,97	108,89	108,52			
Masse über Wasser m_s	[g]	188,9	186,9	188,1	185,1	177,57	185,45	184,13			
Temp des Wassers	[°C]	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4			
Dichte des Wassers ρ_{rh}	[kg/m3]	998,329	998,329	998,329	998,329	998,329	998,329	998,329			
Vol. der offenen Poren V_o	[ml]	11,57	11,38	11,56	11,45	11,88	11,97	11,11	11,56	0,29	0,09
Rohvolumen V_b	[ml]	66,11	65,52	65,80	64,73	61,84	64,72	64,63	64,76	1,41	2,00
Wasseraufnahme	[%]	6,51	6,47	6,54	6,58	7,16	6,89	6,41	6,65	0,27	0,07
Rohdichte ρ_b	[kg/m3]	2283,61	2283,27	2282,34	2279,55	2247,73	2262,41	2284,76	2274,81	14,22	202,35
Offene Porosität p_o	[%]	14,89	14,80	14,94	15,03	16,11	15,61	14,67	15,15	0,52	0,27
Reindichte p_r	[kg/m3]	2748	2766	2750					2754,67	9,87	
Gesamtporosität p	[%]	16,90	17,45	17,01					17,12	0,29	0,09
Prüfer: Florian Hemetsberger						Hergestellt:	22.08.2017				
						Prüfdatum:	10.07.2018				

Normalbeton

Normalbeton		Probe Nr							Probe Nr		
Beschreibung:		1	2	3	4	5	6	7	MW	STABW	Varianz
Trockenmasse m_0	[g]	172,44	180,71	167,42	176,20	183,10	179,34	175,18			
Trockenmasse m_d	[g]	172,46	180,72	167,43	176,19	183,11	179,35	175,2			
Massendifferenz	[%]	-0,01	-0,01	-0,01	0,01	-0,01	-0,01	-0,01			
Masse unter Wasser m_h	[g]	108,16	113,65	104,66	111,73	114,50	112,19	110,19			
Masse über Wasser m_s	[g]	182,55	189,36	177,21	183,64	192,43	189,47	184,94			
Temp des Wassers	[°C]	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2			
Dichte des Wassers ρ_{rh}	[kg/m ³]	998,369	998,369	998,369	998,369	998,369	998,369	998,369			
Vol. der offenen Poren V_o	[ml]	10,11	8,65	9,80	7,46	9,34	10,14	9,76	9,32	0,97	0,93
Rohvolumen V_b	[ml]	64,41	67,18	62,87	64,57	68,72	67,27	65,12	65,73	2,04	4,18
Wasseraufnahme	[%]	5,85	4,78	5,84	4,23	5,09	5,64	5,56	5,28	0,61	0,37
Rohdichte ρ_b	[kg/m ³]	2314,54	2383,11	2304,02	2446,15	2345,84	2317,00	2339,99	2350,09	49,86	2486,48
Offene Porosität p_o	[%]	13,56	11,41	13,48	10,36	11,96	13,10	13,03	12,41	1,21	1,46
Reindichte p_r	[kg/m ³]	2745	2758	2735					2746,00	11,53	
Gesamtporosität p	[%]	15,68	13,59	15,76					15,01	1,23	1,51
Prüfer: Florian Hemetsberger						Hergestellt:	18.08.2017				
						Prüfdatum:	04.07.2018				

Drainbeton												
										Probe Nr		
Beschreibung:		1	2	3	4	5	6	7	MW	STABW	Varianz	
Trockenmasse m_0	[g]	189,40	181,60	188,30	190,90	185,10	190,80	200,70				
Trockenmasse m_d	[g]	189,42	181,62	188,39	190,92	185,20	190,81	200,74				
Massendifferenz	[%]	-0,01	-0,01	-0,05	-0,01	-0,05	-0,01	-0,02				
Masse unter Wasser m_h	[g]	117,66	112,70	116,96	118,33	114,50	118,46	124,29				
Masse über Wasser m_s	[g]	206,28	194,91	204,93	207,23	200,47	207,68	217,10				
Temp des Wassers	[°C]	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6				
Dichte des Wassers ρ_{rh}	[kg/m3]	997,864	997,864	997,864	997,864	997,864	997,864	997,864				
Vol. der offenen Poren V_o	[ml]	16,90	13,32	16,58	16,34	15,30	16,91	16,40	15,96	1,28	1,65	
Rohvolumen V_b	[ml]	71,91	69,07	71,58	72,75	70,85	72,50	76,61	72,18	2,31	5,33	
Wasseraufnahme	[%]	8,90	7,32	8,78	8,54	8,25	8,84	8,15	8,40	0,56	0,31	
Rohdichte ρ_b	[kg/m3]	2132,88	2204,50	2136,95	2142,99	2149,64	2134,08	2158,29	2151,33	25,14	632,17	
Offene Porosität p_0	[%]	19,03	16,17	18,80	18,35	17,76	18,91	17,63	18,09	1,01	1,02	
Reindichte p_r	[kg/m3]	2723	2757	2721					2733,67	20,23		
Gesamtporosität p	[%]	21,67	20,04	21,46					21,06	0,89	0,79	
Prüfer: Florian Hemetsberger						Hergestellt:	26.04.2018					
						Prüfdatum:	03.07.2018					

Substratbeton

Substratbeton		Probe Nr							Probe Nr		
Beschreibung:		1	2	3	4	5	6	7	MW	STABW	Varianz
Trockenmasse m_0	[g]	206,80	204,00	200,40	203,60	199,60	195,10	195,80			
Trockenmasse m_d	[g]	206,81	203,94	200,34	203,74	199,59	195,17	195,84			
Massendifferenz	[%]	0,00	0,03	0,03	-0,07	0,01	-0,04	-0,02			
Masse unter Wasser m_h	[g]	128,62	126,41	124,38	126,50	123,91	121,37	121,67			
Masse über Wasser m_s	[g]	224,82	221,49	217,38	222,31	218,03	211,45	213,18			
Temp des Wassers	[°C]	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6			
Dichte des Wassers ρ_{rh}	[kg/m ³]	997,864	997,864	997,864	997,864	997,864	997,864	997,864			
Vol. der offenen Poren V_o	[ml]	18,05	17,59	17,08	18,61	18,48	16,31	17,38	17,64	0,81	0,66
Rohvolumen V_b	[ml]	78,36	77,70	76,12	77,41	75,84	73,96	74,33	76,24	1,68	2,83
Wasseraufnahme	[%]	8,71	8,61	8,51	9,11	9,24	8,34	8,85	8,77	0,32	0,11
Rohdichte ρ_b	[kg/m ³]	2145,20	2140,35	2149,59	2121,96	2116,06	2162,00	2135,52	2138,67	15,86	251,58
Offene Porosität p_o	[%]	18,72	18,46	18,32	19,38	19,59	18,07	18,95	18,79	0,56	0,31
Reindichte p_r	[kg/m ³]	2682	2711	2718					2703,67	19,09	
Gesamtporosität p	[%]	20,01	21,05	20,91					20,66	0,56	0,32
Prüfer: Florian Hemetsberger						Hergestellt:	26.04.2018				
						Prüfdatum:	03.07.2018				

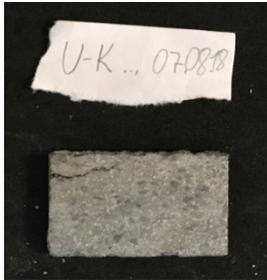
Anhang H: Absorptionsisotherme

Absorptionsisotherme bei 23°C			Durchgeführt: Florian Hemetsberger			
Lagerung	Probe	Einlagerungsart	Einlagerungsende	Lagerungstage	Masse am Ende der Einlagerung [g]	Trockenmasse [g]
9% rel. LF	UHPC	14.06.2018	24.09.2018	102	171,90	170,43
	Normalbeton	14.06.2018	24.09.2018	102	185,90	185,23
	Drainbeton	14.06.2018	24.09.2018	102	184,00	183,37
	Substratbeton	14.06.2018	24.09.2018	102	187,50	186,90
28% rel. LF	UHPC	21.08.2018	29.11.2018	100	176,70	172,55
	Normalbeton	21.08.2018	29.11.2018	100	179,50	178,26
	Drainbeton	21.08.2018	29.11.2018	100	193,40	191,64
	Substratbeton	21.08.2018	29.11.2018	100	193,80	192,11
50% rel. LF	UHPC	14.06.2018	24.09.2018	102	173,30	166,70
	Normalbeton	14.06.2018	24.09.2018	102	171,70	168,58
	Drainbeton	14.06.2018	24.09.2018	102	189,70	187,08
	Substratbeton	14.06.2018	24.09.2018	102	201,30	198,48
65% rel. LF	UHPC	14.06.2018	13.08.2018	60	177,82	170,15
	Normalbeton	14.06.2018	13.08.2018	60	189,81	185,13
	Drainbeton	14.06.2018	13.08.2018	60	186,39	183,44
	Substratbeton	14.06.2018	13.08.2018	60	190,10	186,95
75% rel. LF	UHPC	14.06.2018	14.08.2018	61	181,62	175,50
	Normalbeton	14.06.2018	14.08.2018	61	181,52	178,12
	Drainbeton	14.06.2018	14.08.2018	61	189,19	187,41
	Substratbeton	14.06.2018	14.08.2018	61	185,30	183,59

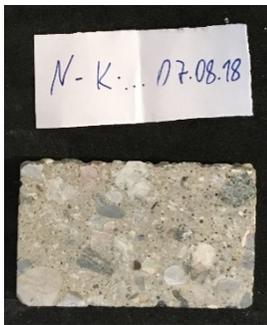
Anhang I: Optisches pH-Messverfahren

Probenaufistung:

- Poröser UHPC



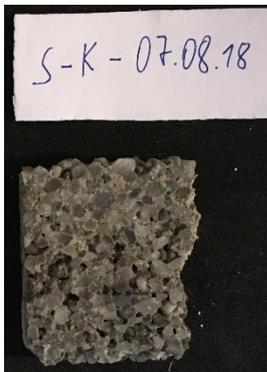
- Normalbeton



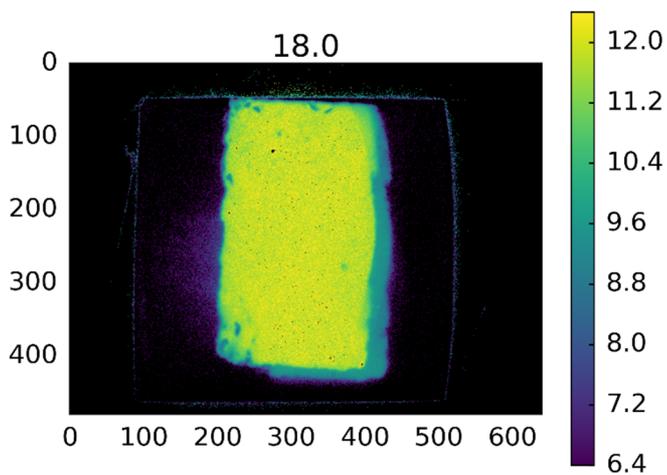
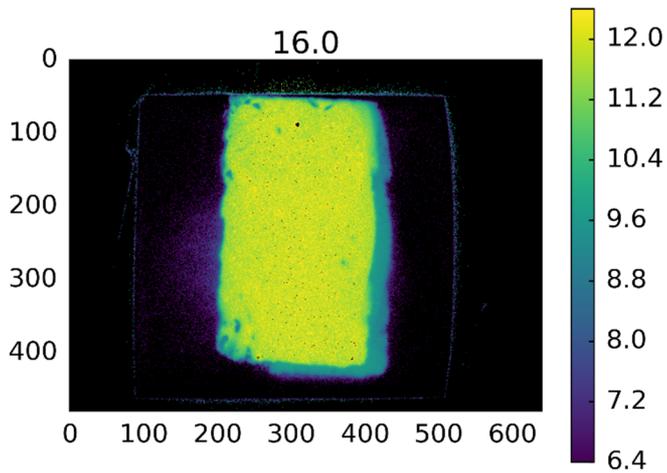
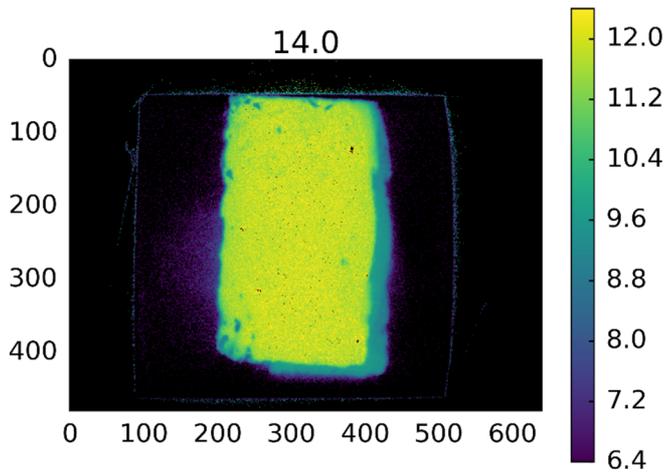
- Drainbeton



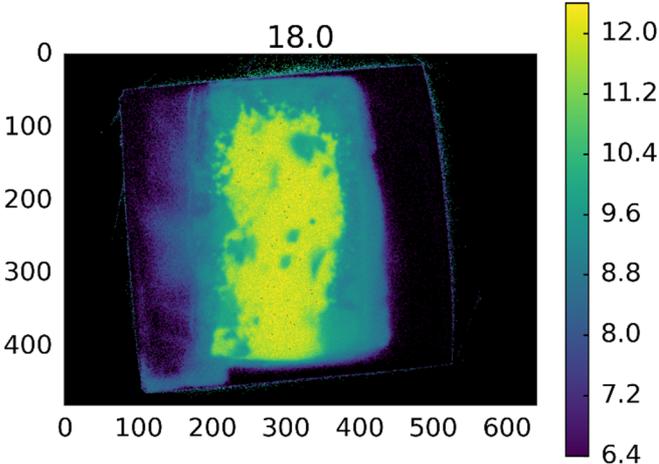
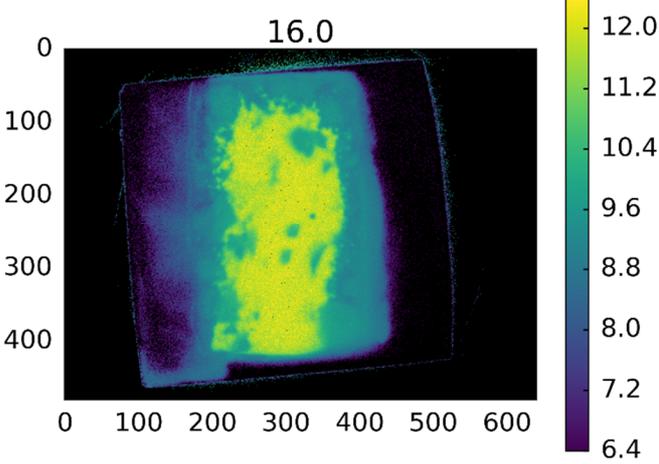
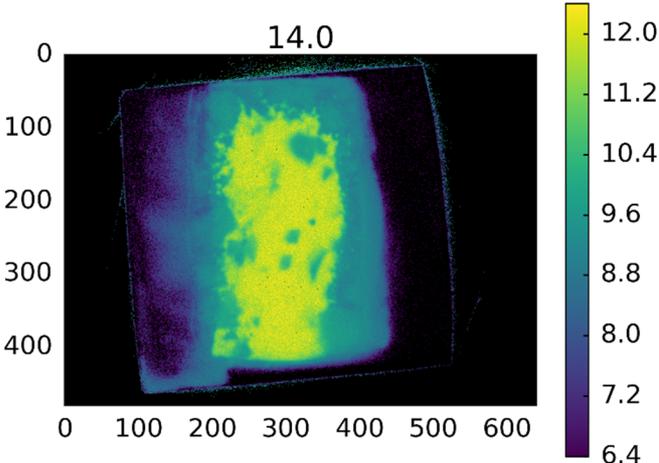
- Substratbeton



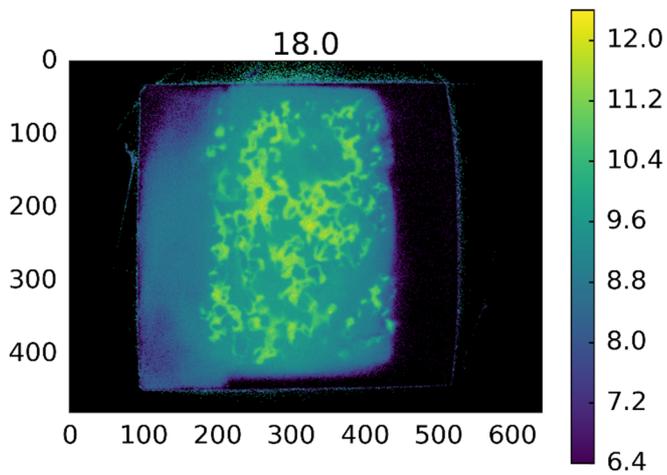
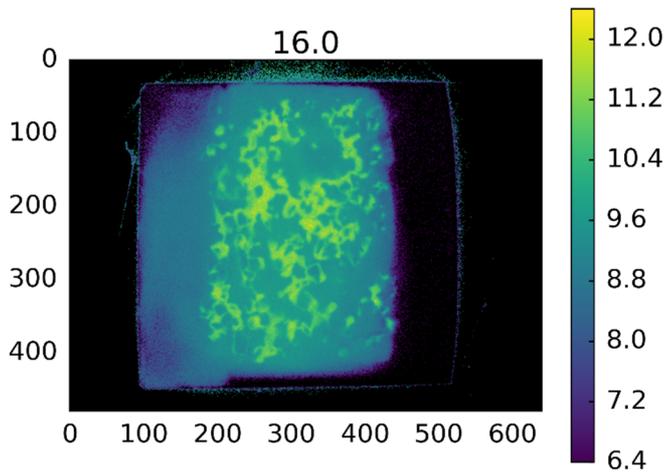
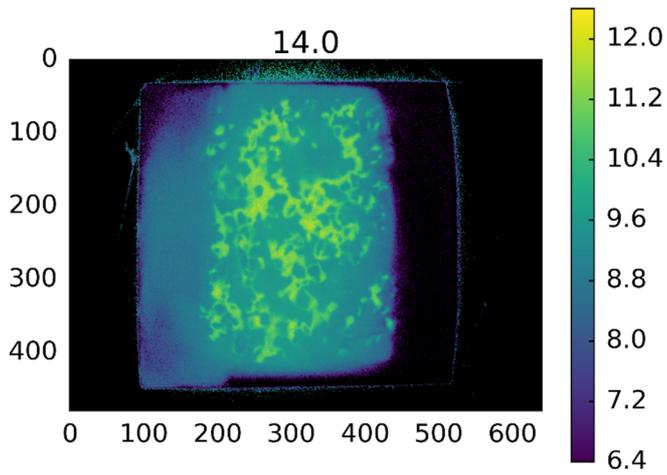
Bildanalyse poröser UHPC (bei t = 14, 16, 18):



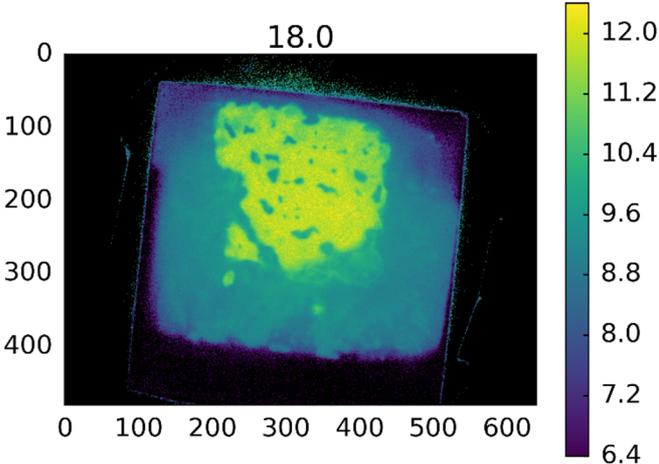
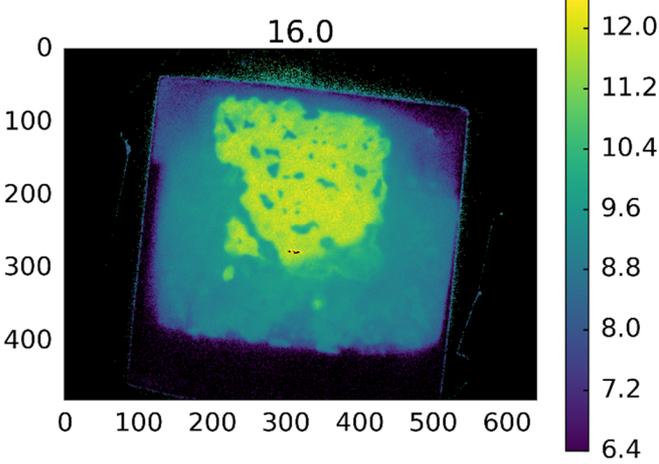
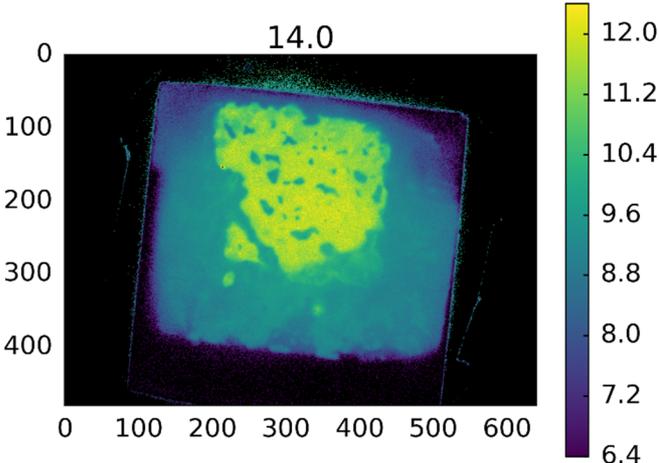
Bildanalyse Normalbeton (bei t = 14, 16, 18):



Bildanalyse Drainbeton (bei t = 14, 16, 18):



Bildanalyse Substratbeton (bei t = 14, 16, 18):



Anhang J: Bildanalyse pH-Diffusionsprüfung

1. Versuch:

- Methylrotmessung vor der Lagerung:

Poröser UHPC



Normalbeton



Drainbeton



Substratbeton



- Poröser UHPC (Lagerungsstart 13.08.2018):

Versuchsaufbau



Methylrotmessung nach 2 Tagen



Methylrotmessung nach 4 Tagen



Methylrotmessung nach 6 Tagen



Die Temperatur- und pH-Daten sind im elektronischen Anhang verfügbar.

- Normalbeton (Lagerungsstart 01.08.2018):

Versuchsaufbau:



Methylrotmessung nach 2 Tagen



Methylrotmessung nach 4 Tagen



Methylrotmessung nach 6 Tagen



Die Temperatur- pH-Daten sind im elektronischen Anhang verfügbar.

- Drainbeton (Lagerungsstart 02.08.2018):

Versuchsaufbau:



Methylrotmessung nach 2 Tagen



Methylrotmessung nach 4 Tagen



Methylrotmessung nach 6 Tagen



Die Temperatur- und pH-Daten sind im elektronischen Anhang verfügbar.

- Substratbeton (Lagerungsstart 13.08.2018):

Versuchsaufbau:



Methylrotmessung nach 2 Tagen



Methylrotmessung nach 4 Tagen



Methylrotmessung nach 6 Tagen



2. Versuch:

- Proben vor dem Versuchsstart:



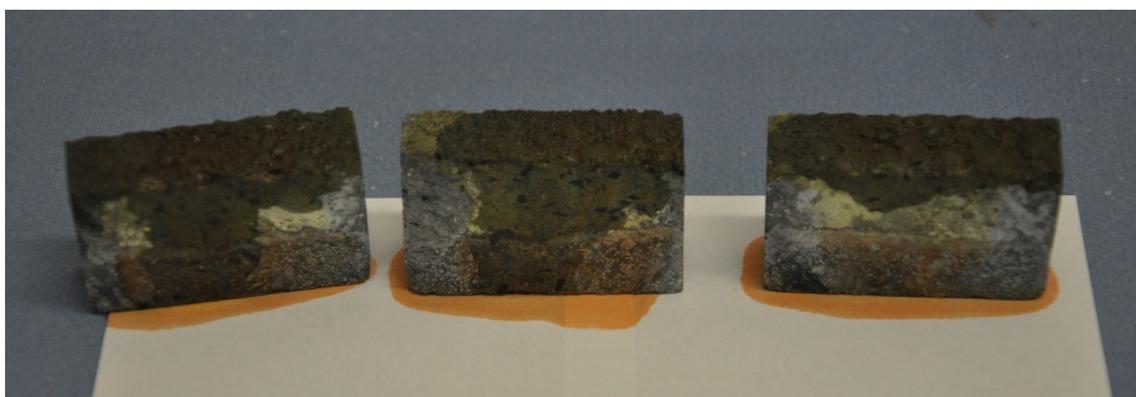
- Einzelne Oberflächenprüfung der Proben mit Methylrot vor Versuchsstart:



- Lagerung (noch ohne Abdeckung):



- Methylrotmessung poröser UHPC:



- Methylrotmessung Normalbeton:



- Methylrotmessung Drainbeton:



- Methylrotmessung Substratbeton:



- Messergebnisse mit Extech CL200 Chloridsonde mit einem Extech PH105 pH Elektrodenmodul:

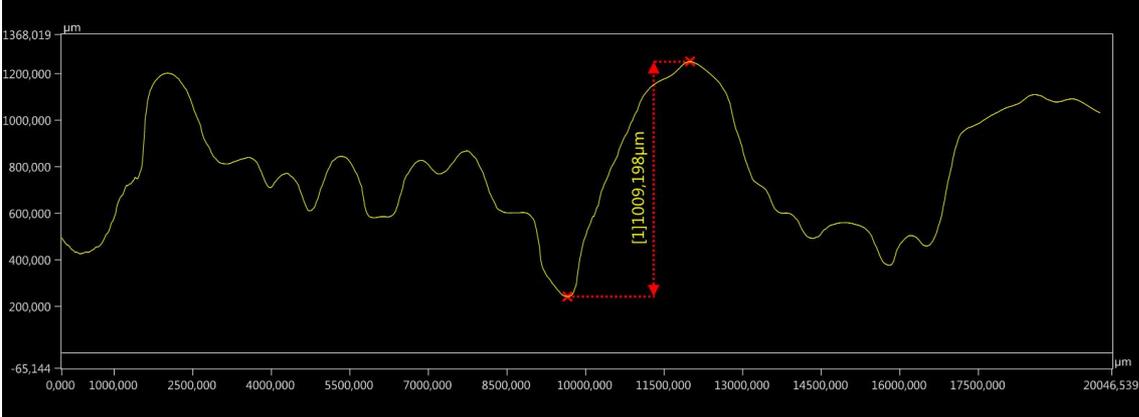
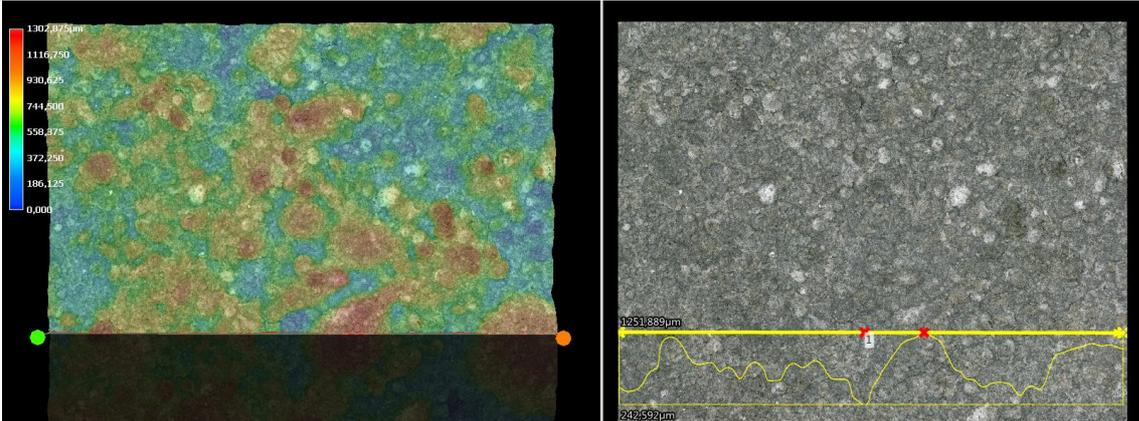
Oberflächen pH Messung				
Gerät: Extech Chloridsonde mit Extech pH Elektrodenmodul				
Lagerungsstart: 03.08.2018				
Lagerungsdauer: 14 Tage				
Probe:	pH			Durchschnitt
UHPC	8,5	7,8	8,2	8,2
Normalbeton	8,2	7,8	8,0	8,0
Drainbeton	8,1	8,3	8,2	8,2
Substratbeton	7,8	8,3	8,4	8,2

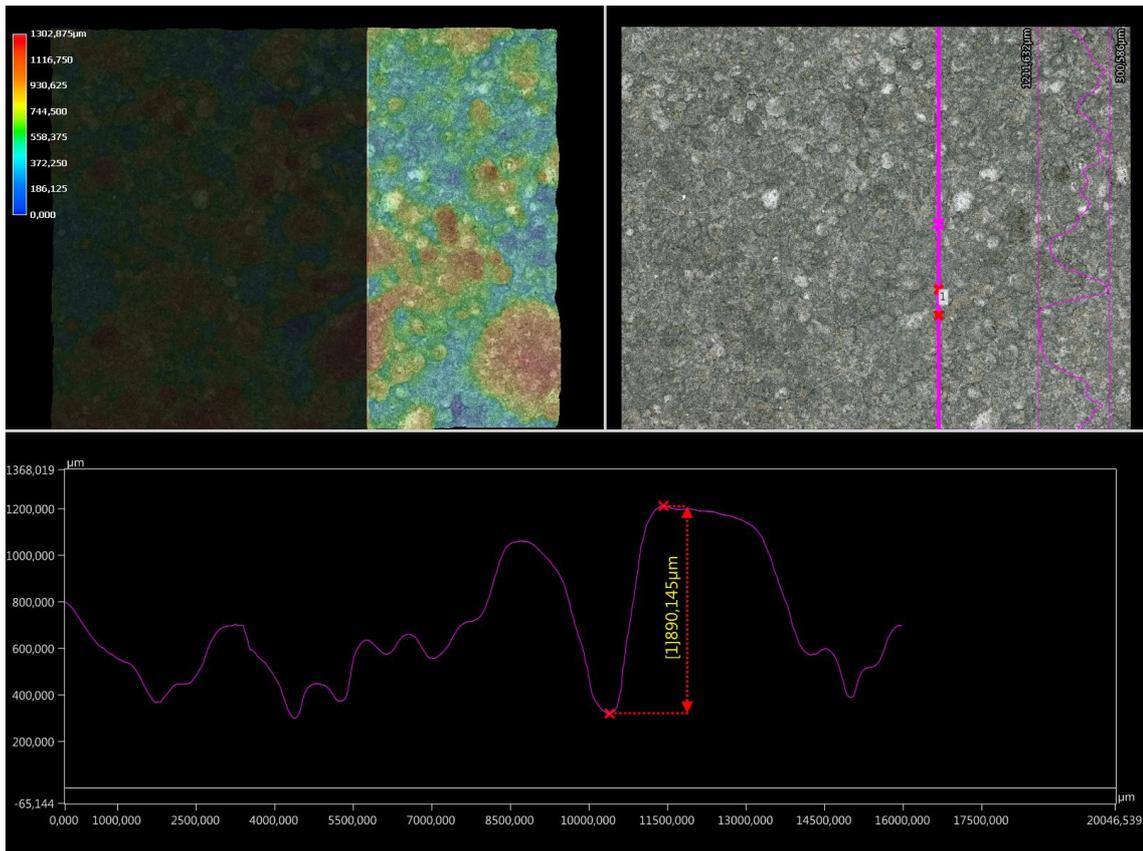
Anhang K: Mikroskopie

50-fache Vergrößerung:

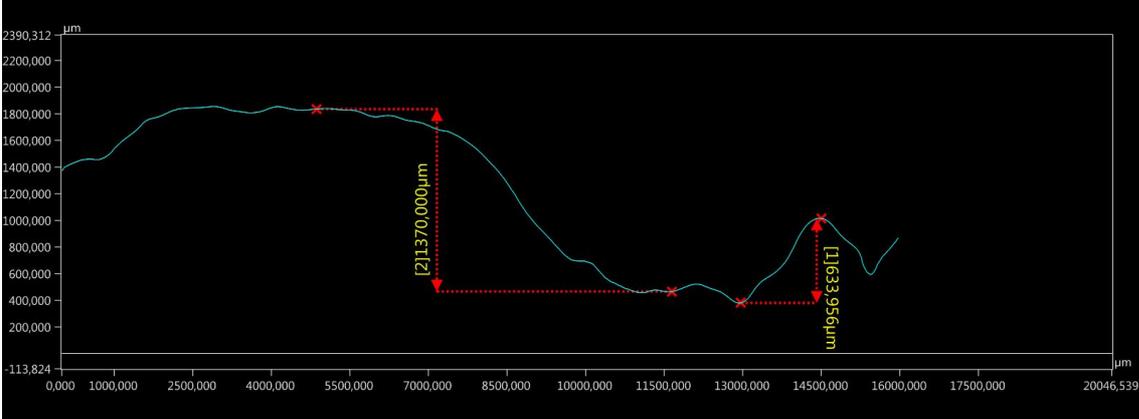
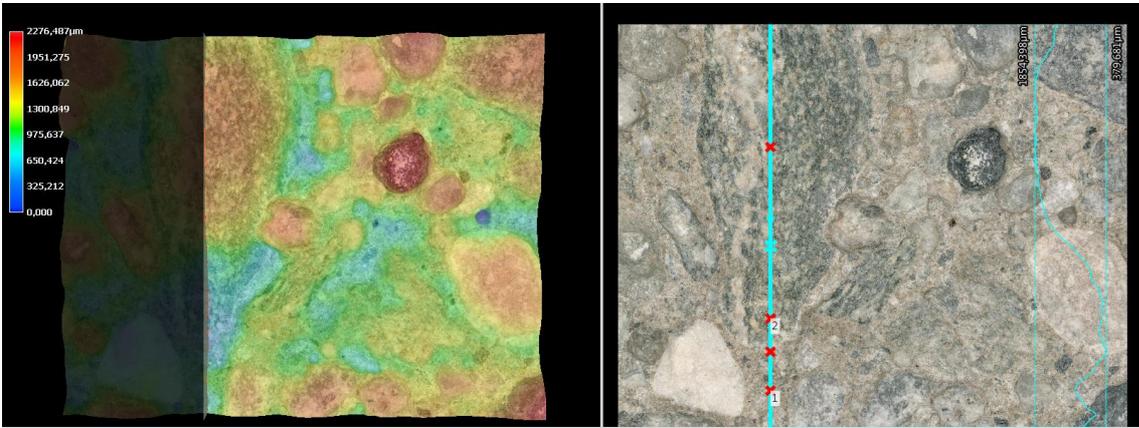
Einzeloberflächenanalyse

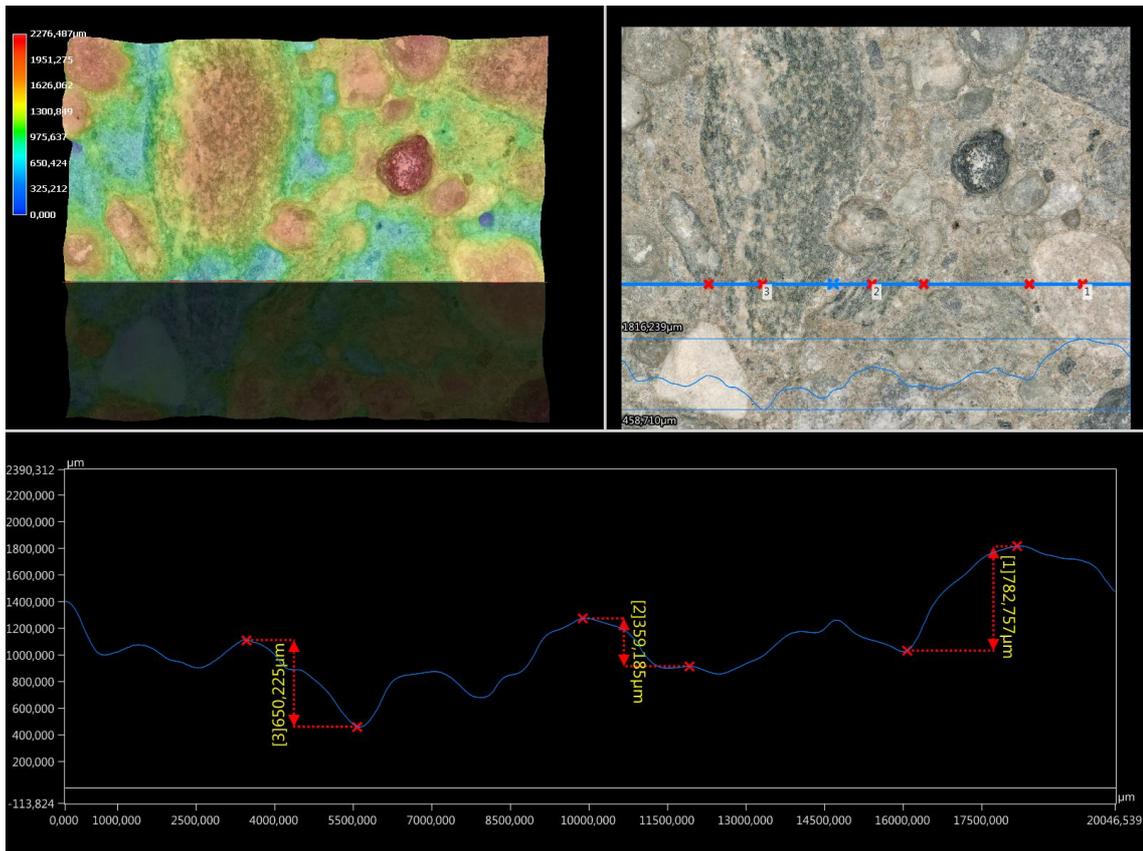
- Poröser UHPC



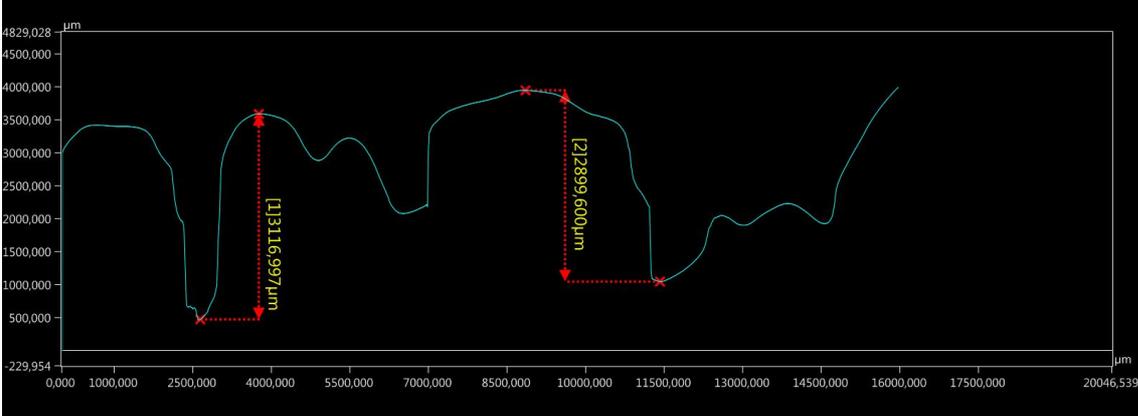
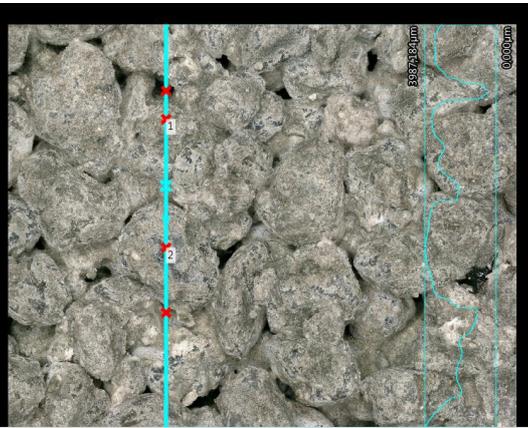
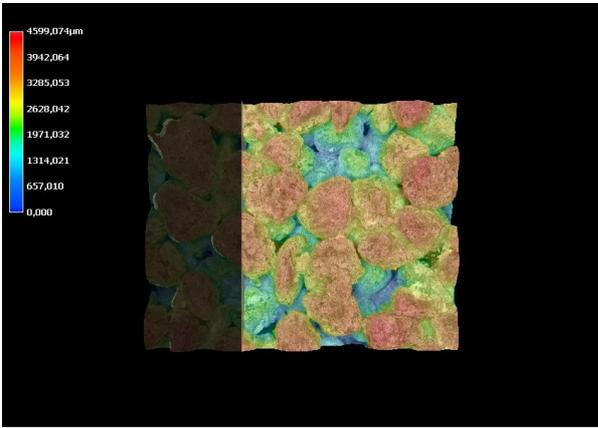


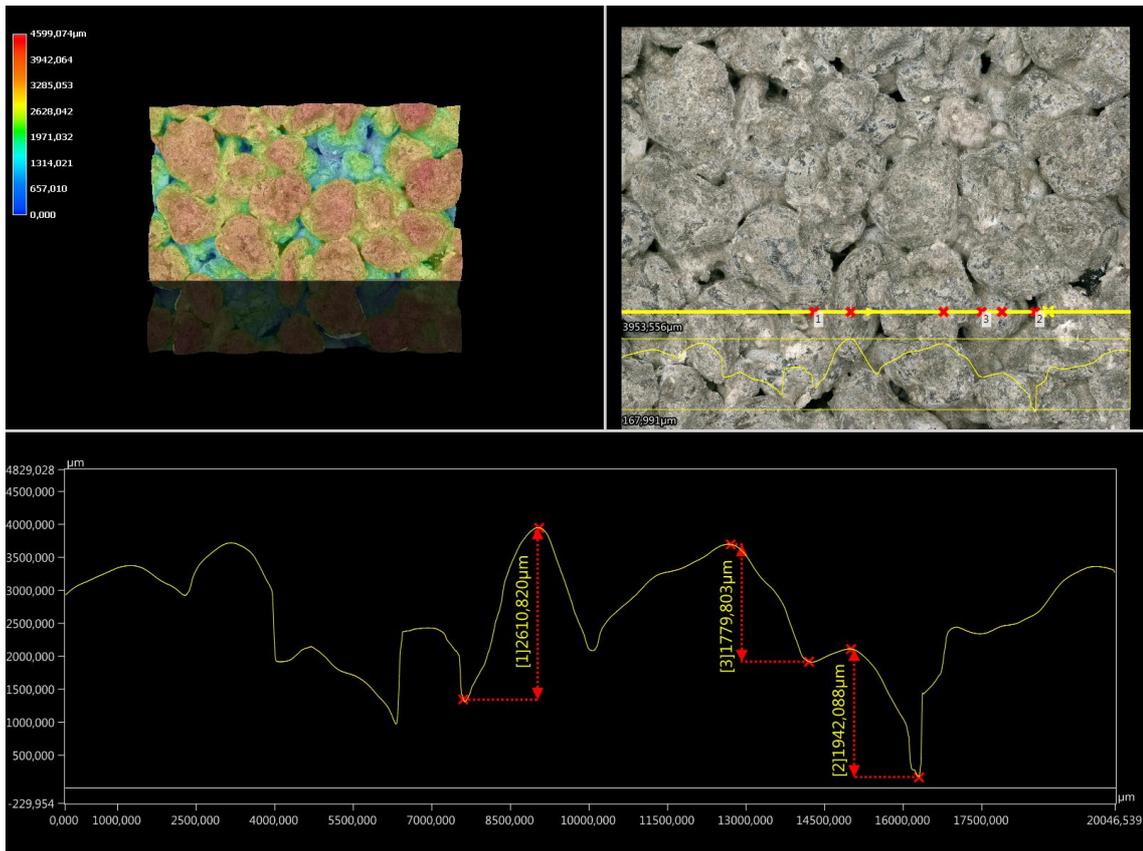
- Normalbeton



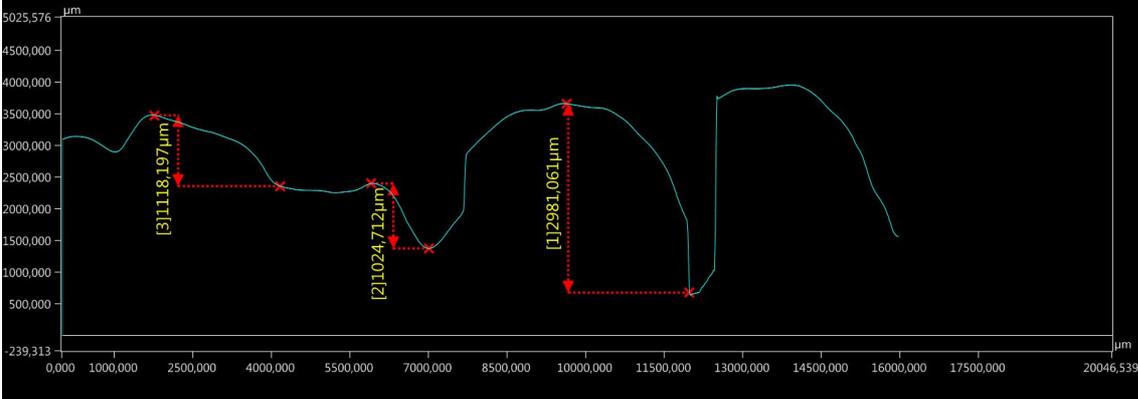
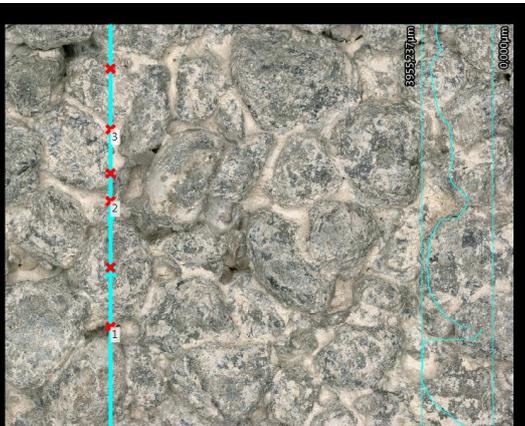
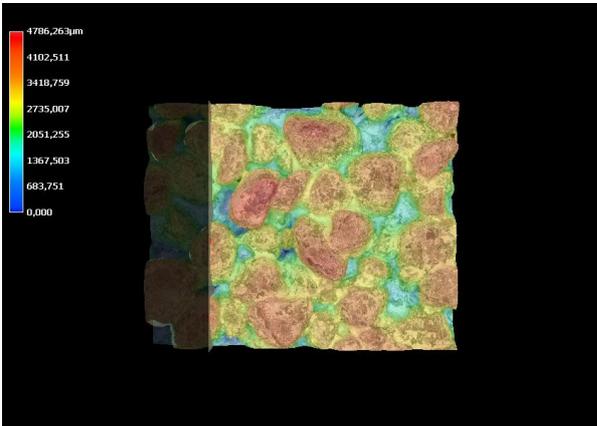


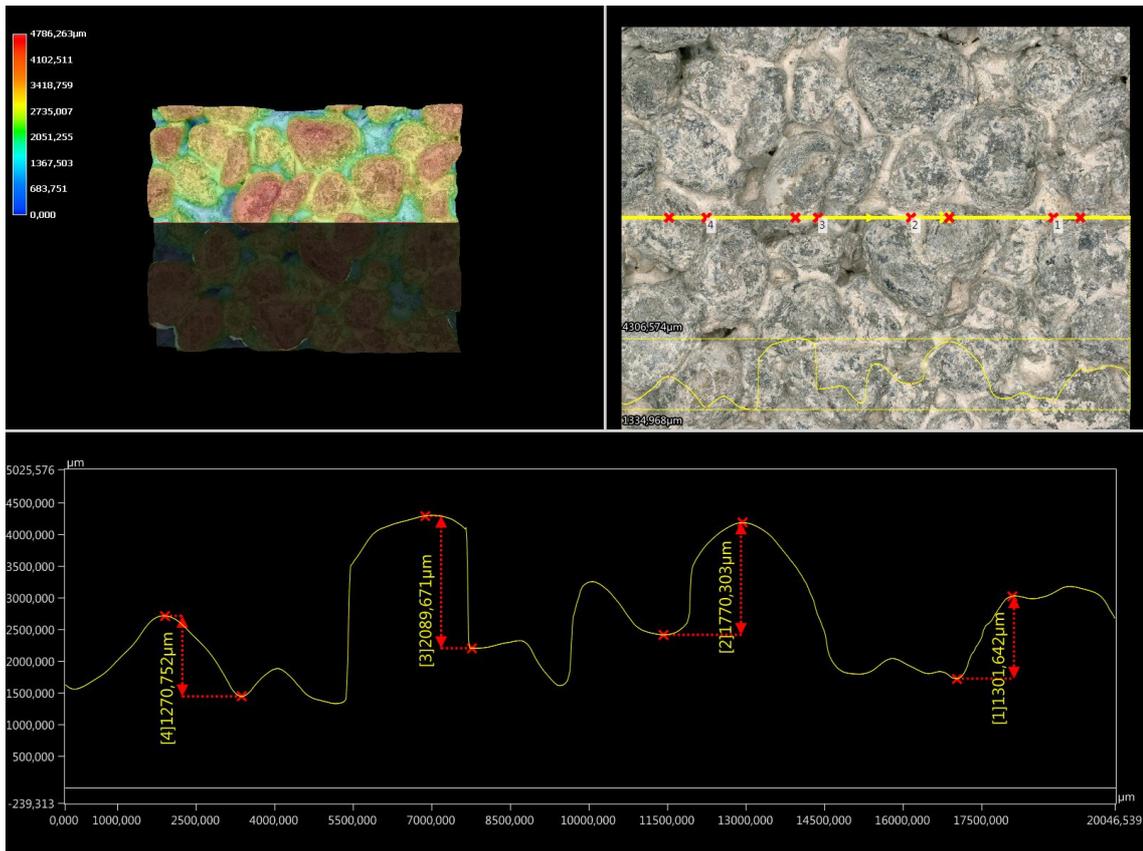
- Drainbeton





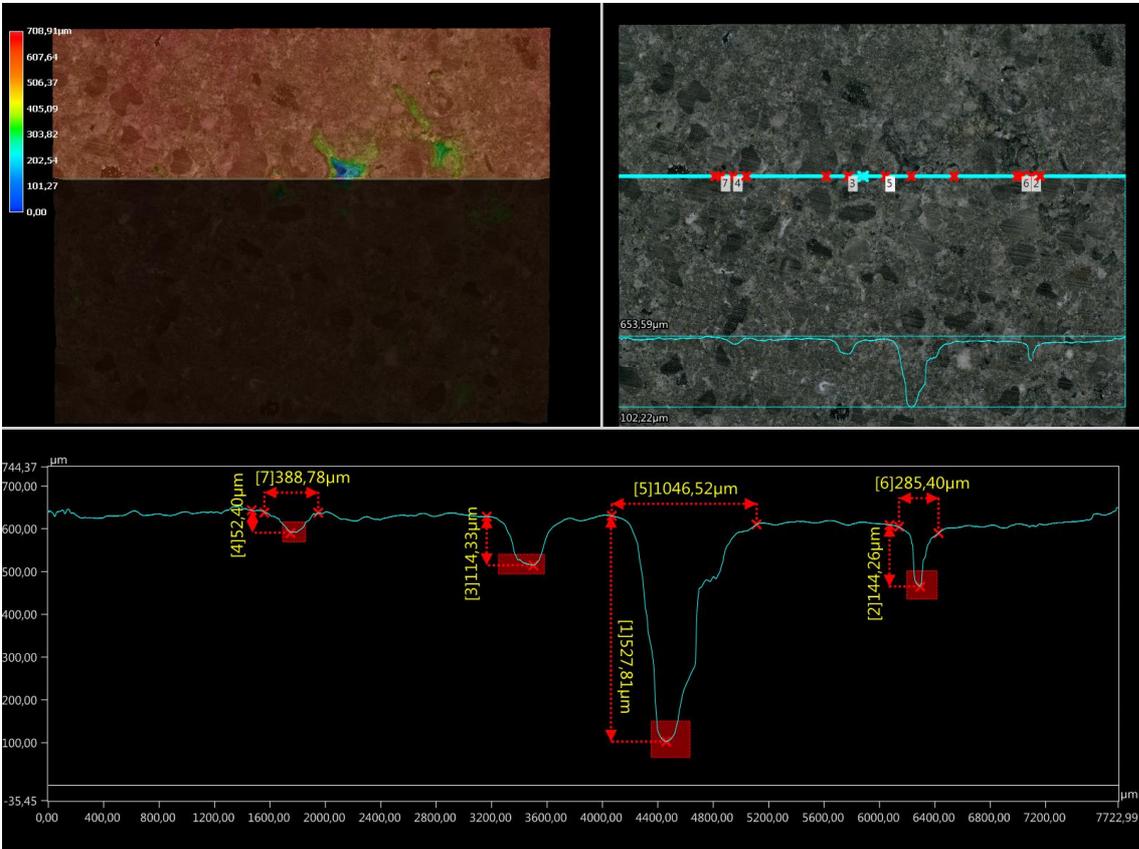
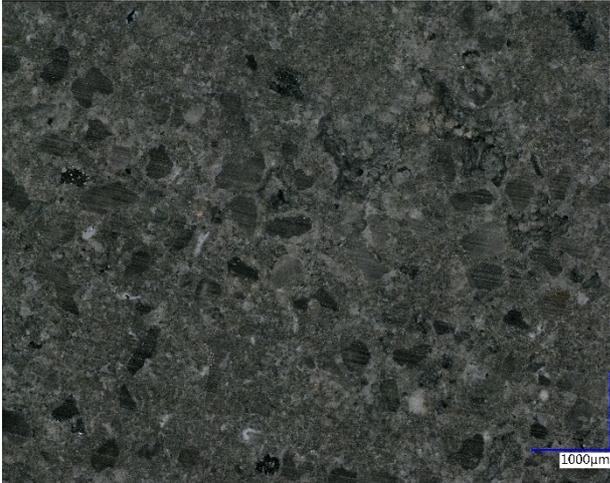
- Substratbeton

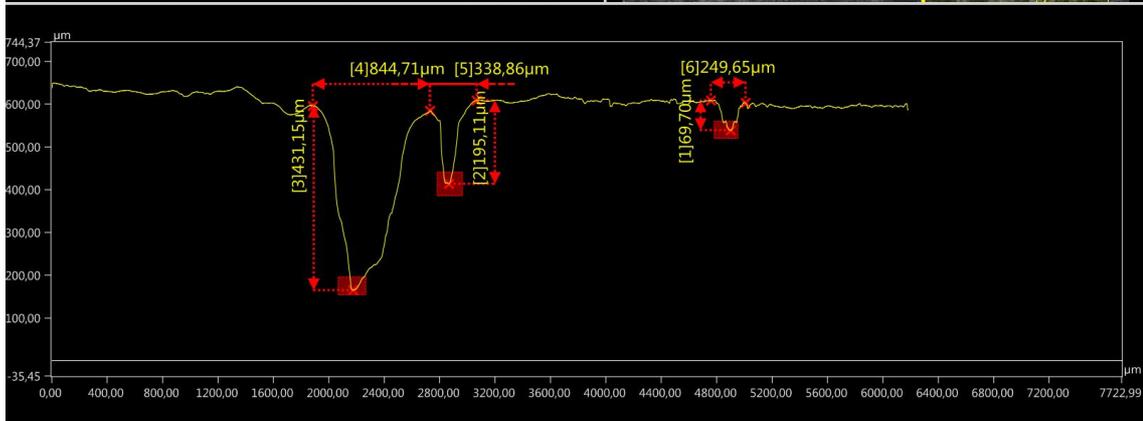
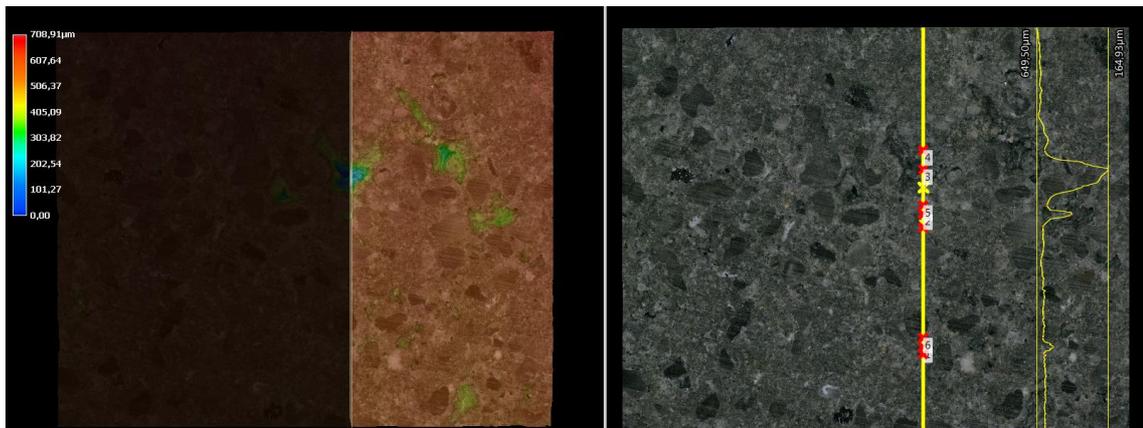
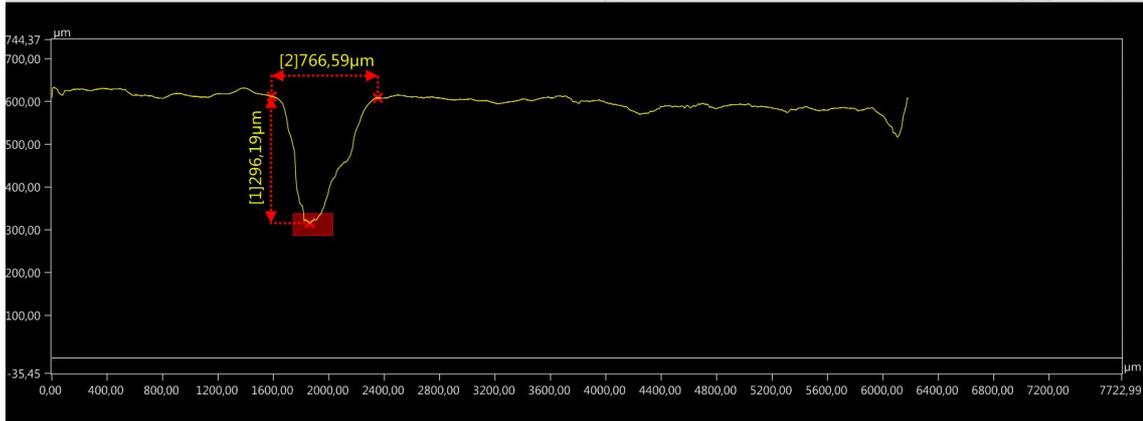
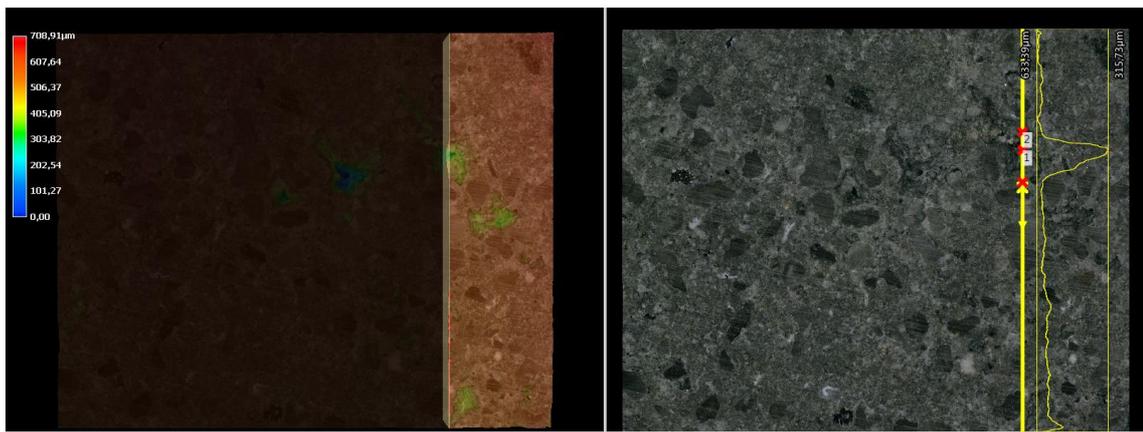


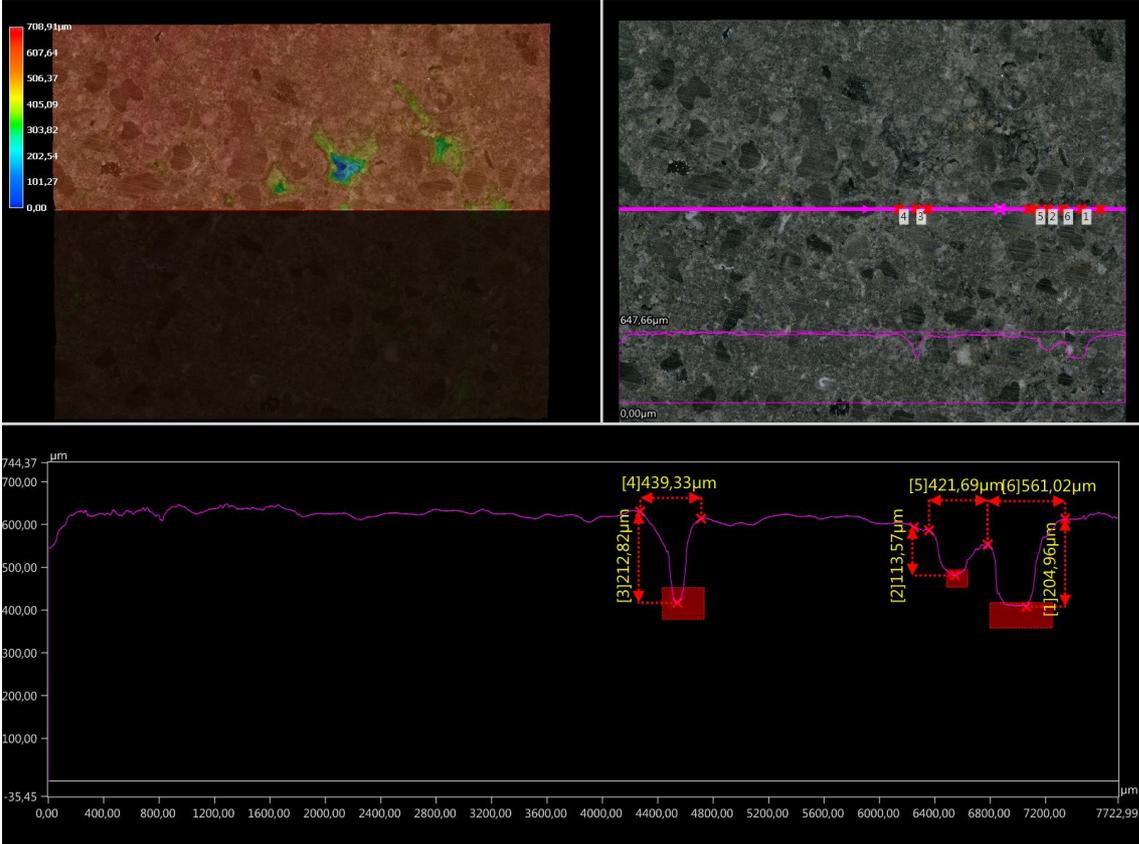


150-fache Vergrößerung (Analyse des Querschnitts):

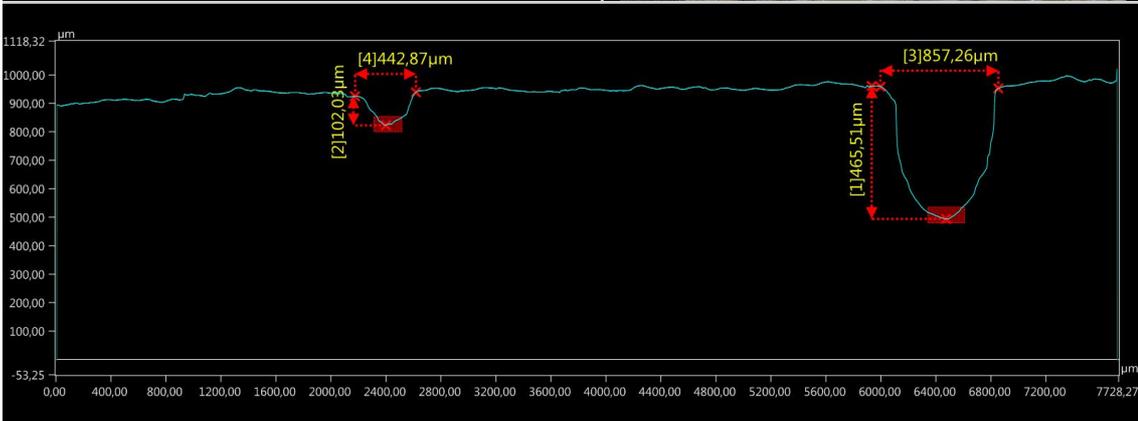
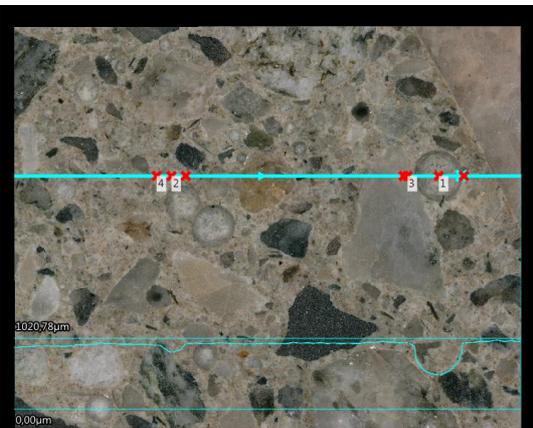
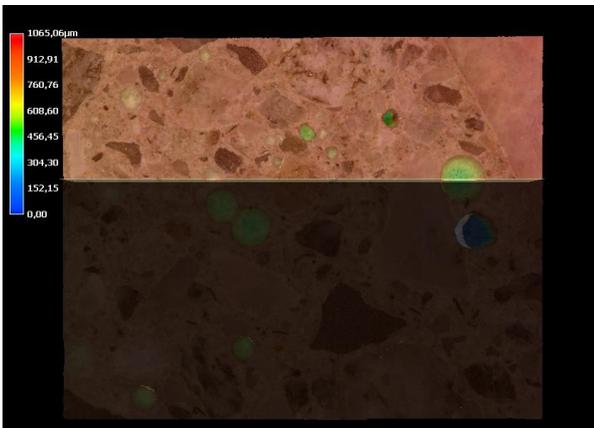
- Poröser UHPC

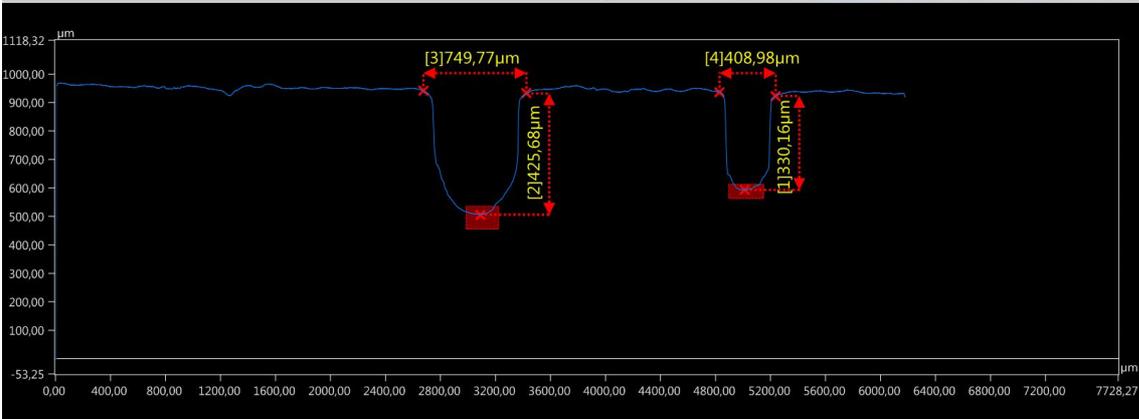
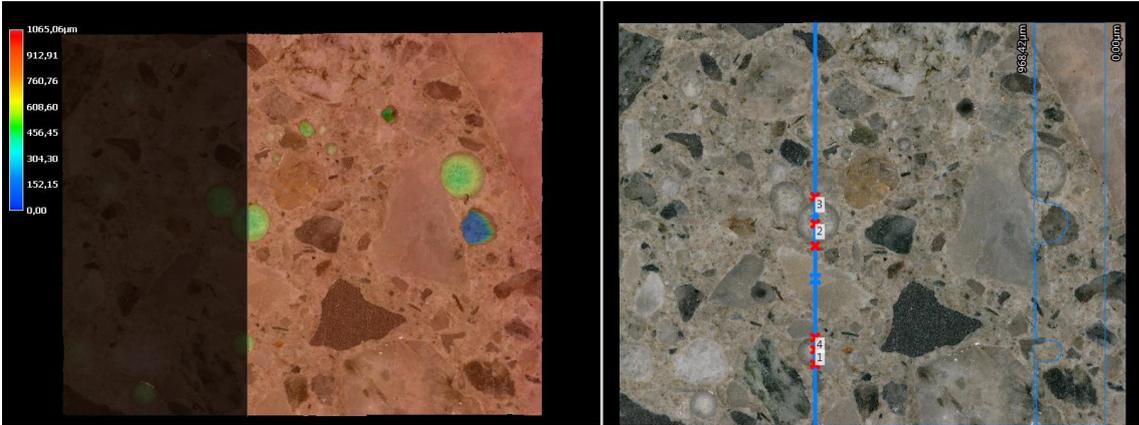
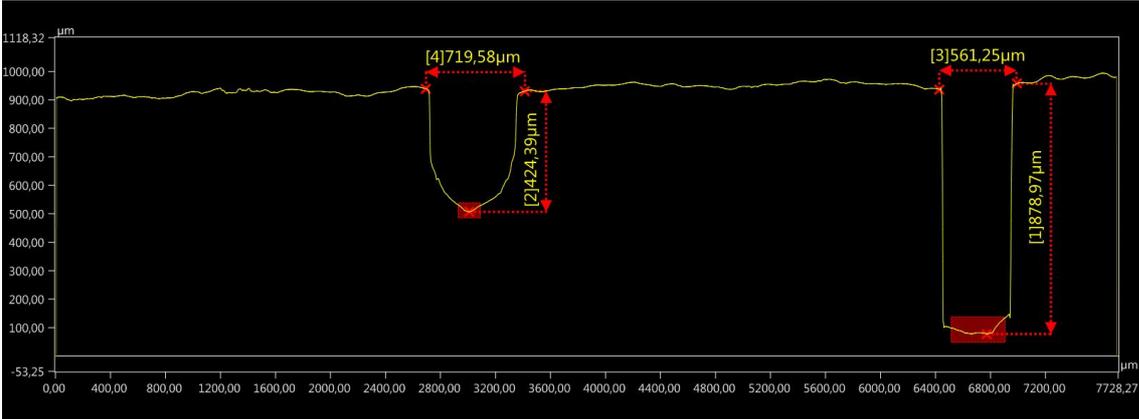
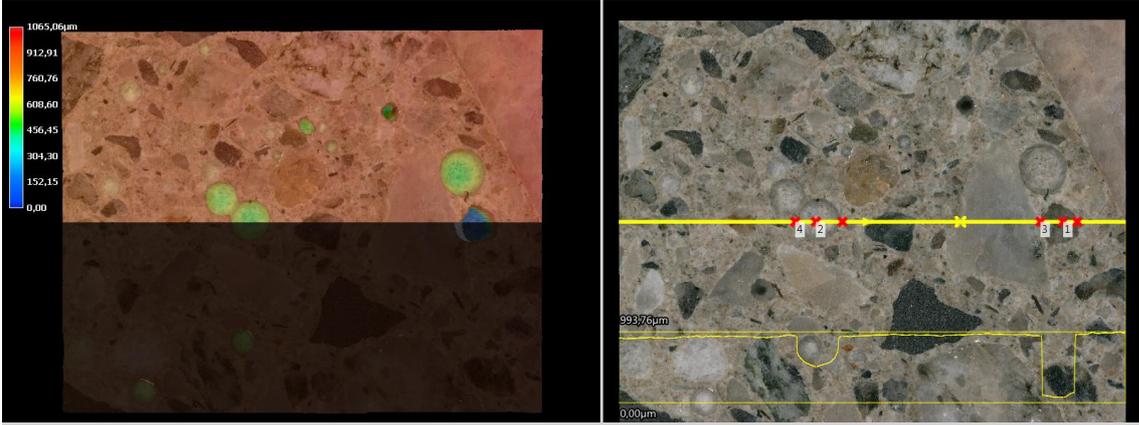


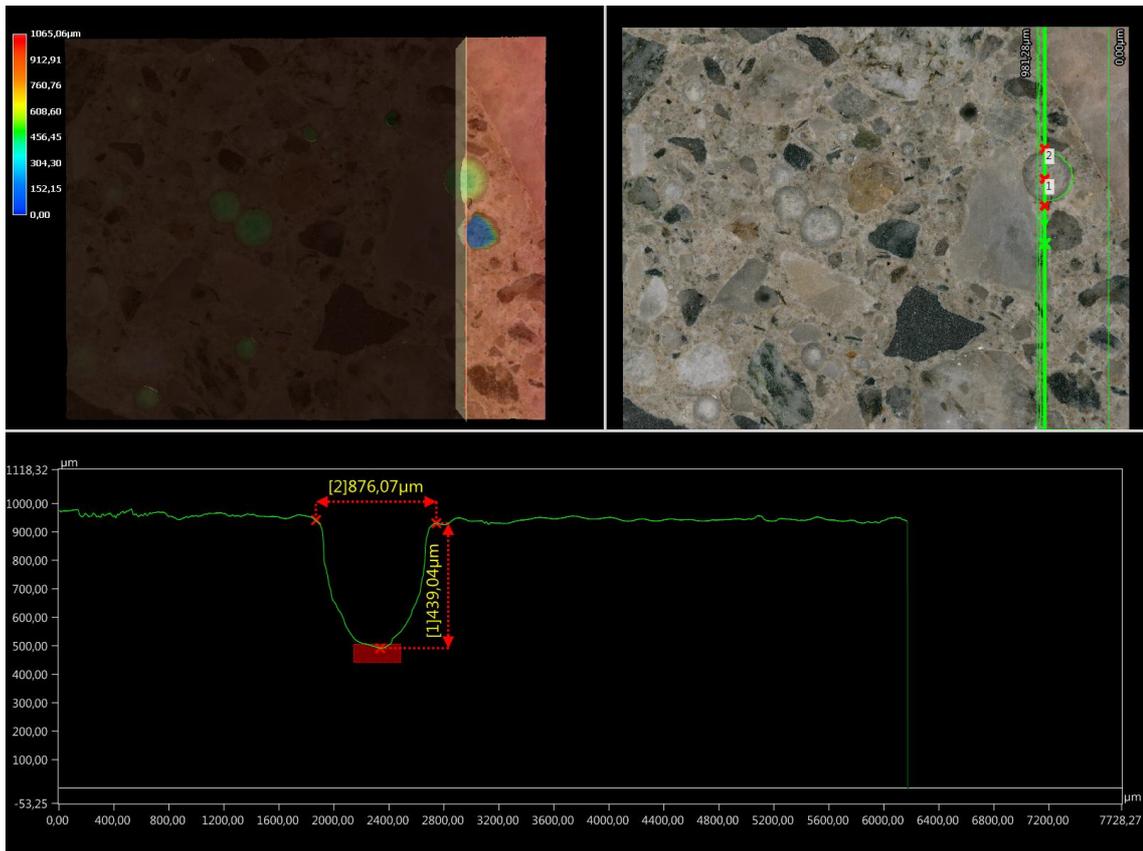




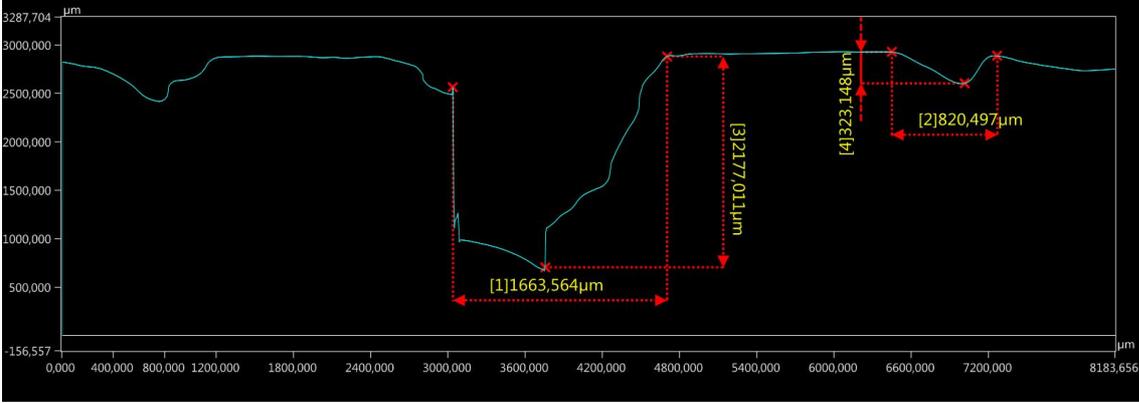
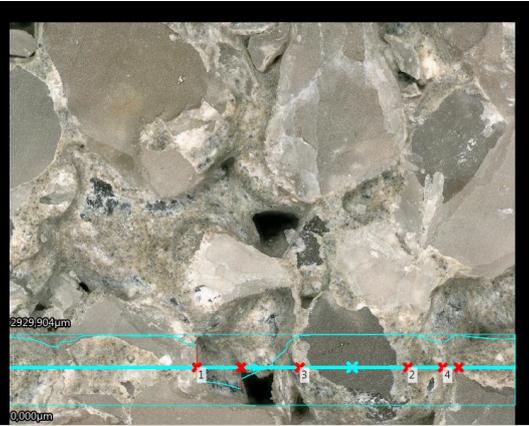
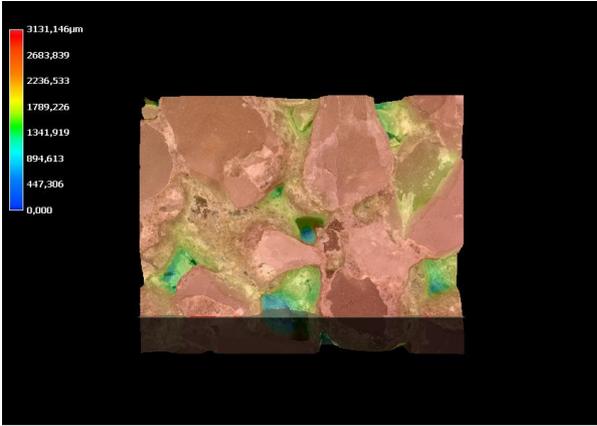
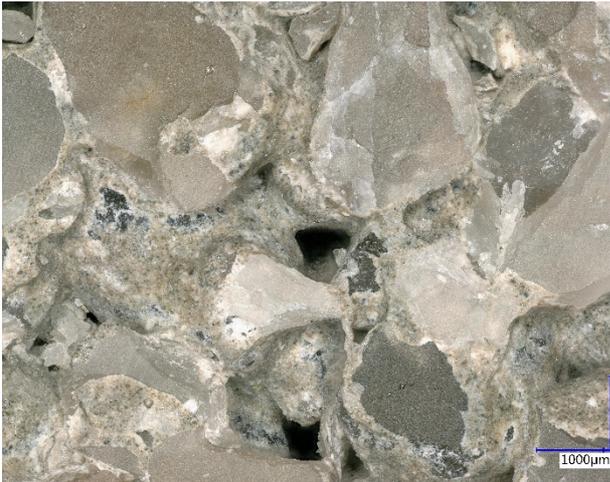
- Normalbeton

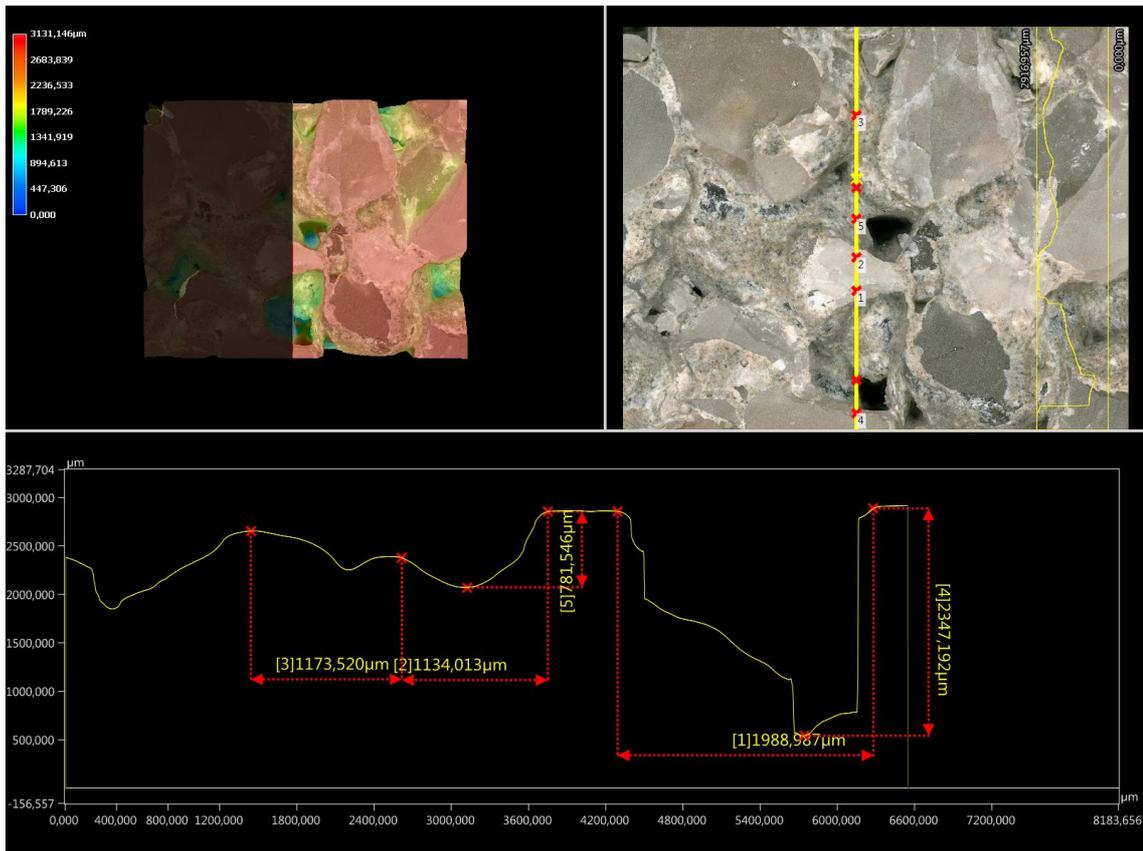




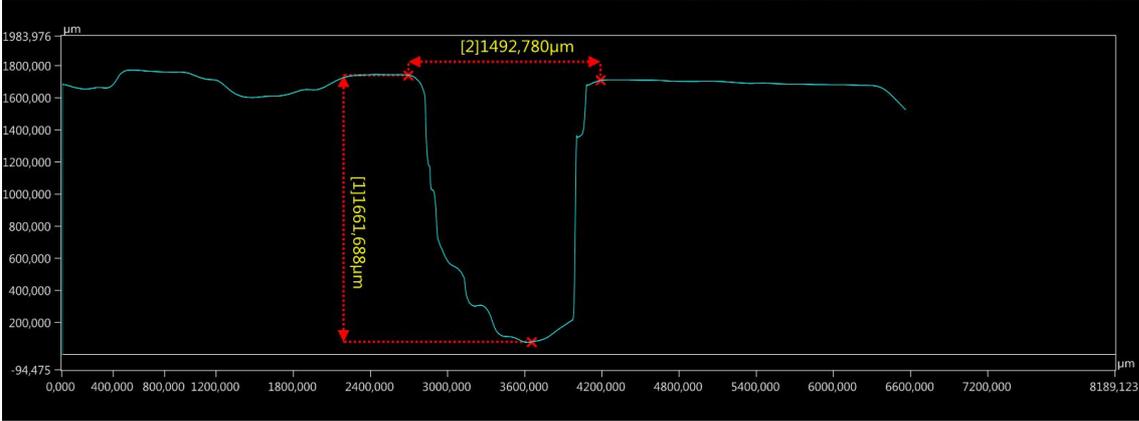
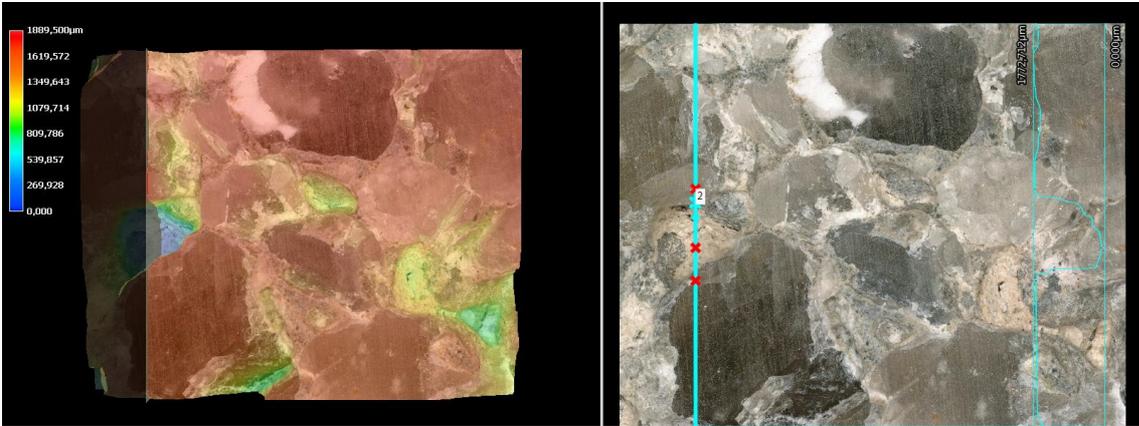


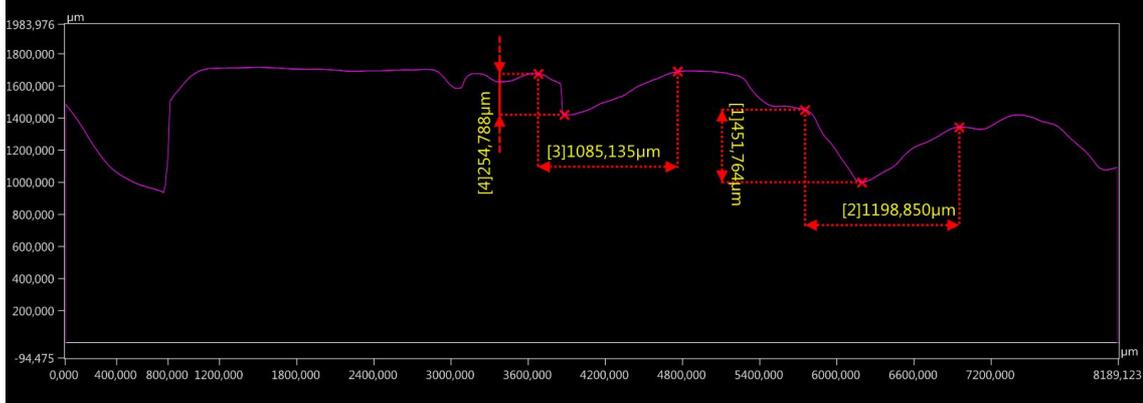
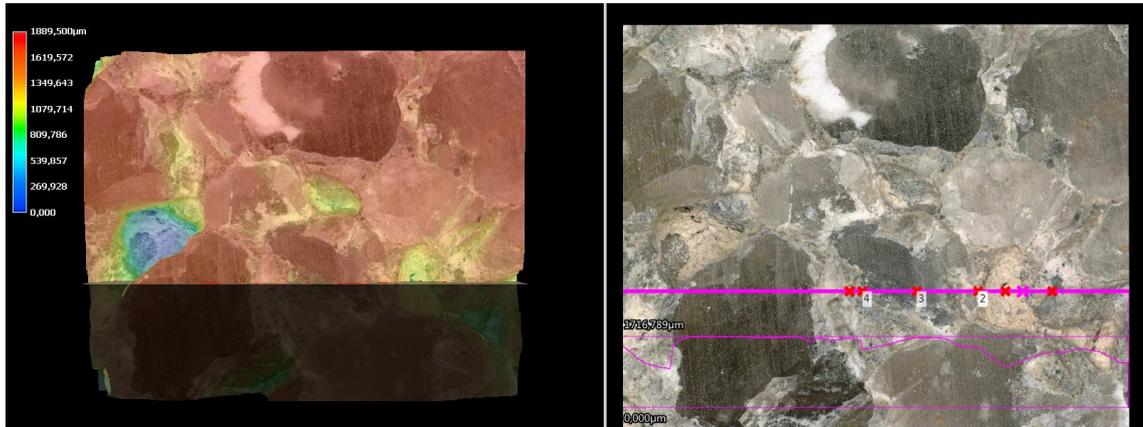
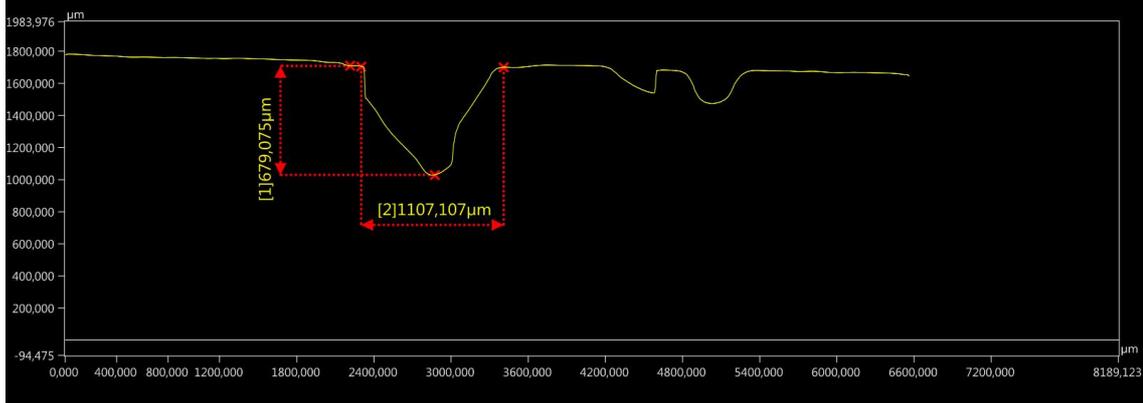
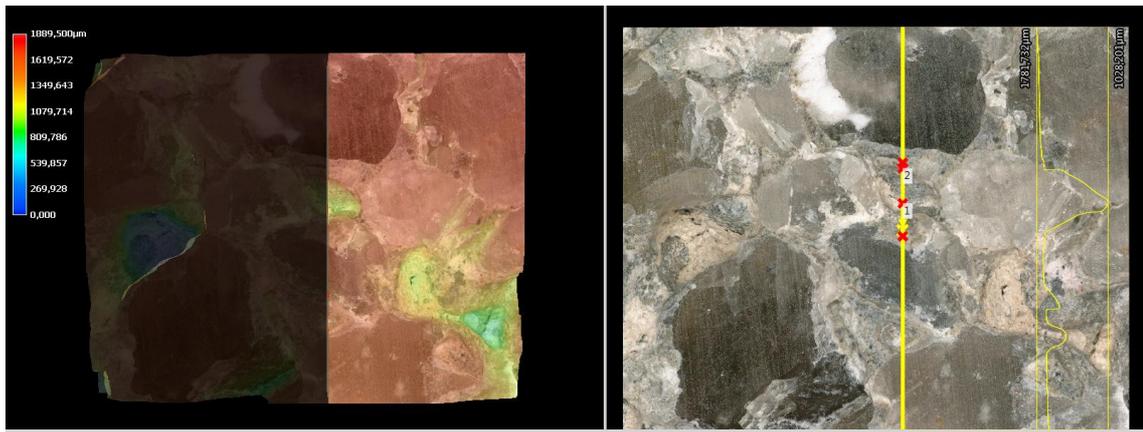
- Drainbeton





- Substratbeton





Anhang L: Bildanalyse Mooswachstum

Mooszuwachs schattige Auslagerung

Index	Datum	Referenzpix	Moospixel	Breite Zollst	Fläche [cm ²]	MZ,i [%]
UHPC _{SCH-1-K}	06.06.2018	22679	977408	1,6	69,0	100
	05.10.2018	25898	183567	1,7	12,0	17
	15.06.2019	26129	129146	3,1	15,3	127
UHPC _{SCH-2-K}	06.06.2018	22905	697398	1,6	48,7	100
	05.10.2018	23633	392292	1,7	28,2	58
	15.06.2019	25013	253250	3,1	31,4	111
UHPC _{SCH-3-K}	06.06.2018	22402	816319	1,6	58,3	100
	05.10.2018	24733	365457	1,7	25,1	43
	15.06.2019	27723	207388	3,1	23,2	92
N _{SCH-1}	06.06.2018	21970	685447	1,6	49,9	100
	05.10.2018	24859	349796	1,7	23,9	48
	15.06.2019	26045	184682	3,1	22,0	92
N _{SCH-2}	06.06.2018	22128	676748	1,6	48,9	100
	05.10.2018	24509	132230	1,7	9,2	19
	15.06.2019					
N _{SCH-3}	06.06.2018	22083	946408	1,6	68,6	100
	05.10.2018	24340	561461	1,7	39,2	57
	15.06.2019	26044	296823	3,1	35,3	90
N _{SCH-4}	06.06.2018	21922	1370232	1,6	100,0	100
	05.10.2018	23657	859858	1,7	61,8	62
	15.06.2019	24943	525242	3,1	65,3	106
N _{SCH-5}	06.06.2018	24922	533369	1,6	34,2	100
	05.10.2018	26529	273905	1,7	17,6	51
	15.06.2019	25789	101305	3,1	12,2	69
N _{SCH-6}	06.06.2018	23409	301371	1,6	20,6	100
	05.10.2018	25825	142435	1,7	9,4	46
	15.06.2019	25629	59091	3,1	7,1	76
N _{SCH-1-K}	Ausfall, Nährlösung löst sich					
	von der Betonoberfläche					
N _{SCH-2-K}	Ausfall, Nährlösung löst sich					
	von der Betonoberfläche					
N _{SCH-3-K}	06.06.2018	23018	1033391	1,6	71,8	100
	05.10.2018	24615	382687	1,7	26,4	37
	15.06.2019					
N _{SCH-4-K}	06.06.2018	21119	1031348	1,6	78,1	100
	05.10.2018	22938	537632	1,7	39,8	51
	15.06.2019	26067	180142	3,1	21,4	54

Anhang L: Bildanalyse Mooswachstum

Index	Datum	Referenzpix	Moospixel	Breite Zollst	Fläche [cm ²]	MZ,i [%]
D _{SCH-1}	06.06.2018	22139	2210047	1,6	159,7	100
	05.10.2018	24903	1581487	1,7	108,0	68
	15.06.2019	28850	1300267	3,1	139,7	129
D _{SCH-2}	06.06.2018	23116	1615034	1,6	111,8	100
	05.10.2018	22273	1354208	1,7	103,4	92
	15.06.2019	26274	969841	3,1	114,4	111
D _{SCH-3}	06.06.2018	23145	1449278	1,6	100,2	100
	05.10.2018	24514	1273759	1,7	88,3	88
	15.06.2019	26660	954921	3,1	111,0	126
D _{SCH-4}	06.06.2018	22306	1341532	1,6	96,2	100
	05.10.2018	23977	1145597	1,7	81,2	84
	15.06.2019	28529	829432	3,1	90,1	111
D _{SCH-1-K}	06.06.2018	22695	3377090	1,6	238,1	100
	05.10.2018	23954	2114722	1,7	150,1	63
	15.06.2019	27748	1561755	3,1	174,5	116
D _{SCH-2-K}	06.06.2018	22884	3063163	1,6	214,2	100
	05.10.2018	23290	1885022	1,7	137,6	64
	15.06.2019	27209	1447342	3,1	164,9	120
D _{SCH-3-K}	06.06.2018	22606	2878332	1,6	203,7	100
	05.10.2018	23616	1632263	1,7	117,5	58
	15.06.2019	27390	1158627	3,1	131,1	112
D _{SCH-4-K}	06.06.2018	22889	2414998	1,6	168,8	100
	05.10.2018	23423	1381529	1,7	100,3	59
	15.06.2019	26820	1181870	3,1	136,6	136
S _{SCH-1-K}	06.06.2018	22301	2351977	1,6	168,7	100
	05.10.2018	25112	1748937	1,7	118,4	70
	15.06.2019	26850	1452121	3,1	167,7	142
S _{SCH-2-K}	06.06.2018	22475	1694201	1,6	120,6	100
	05.10.2018	24300	1176009	1,7	82,3	68
	15.06.2019	26772	826083	3,1	95,7	116
S _{SCH-3-K}	06.06.2018	22440	2052621	1,6	146,4	100
	05.10.2018	24345	1631752	1,7	113,9	78
	15.06.2019	26700	1090092	3,1	126,6	111
S _{SCH-4-K}	Ausfall, Nährlösung löst sich					
	von der Betonoberfläche					

Anhang L: Bildanalyse Mooswachstum

Mooswachstum schattige Auslagerung

Index	Datum	Moosart	Referenzpixel	Moospixel	Breite Zollstab	Fläche [cm ²]	MW _i [%]
UHPC _{SCH} -1-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	22679	0	1,6	0,0	
		Hypnum cupressiforme	22679	284192	1,6	20,0	
		Brachythecium rutabulum	22679	0	1,6	0,0	
		Rhynchostegium murale	22679	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	25855	0	1,7	0,0	
		Hypnum cupressiforme	25855	413181	1,7	27,2	135
		Brachythecium rutabulum	25855	0	1,7	0,0	
		Rhynchostegium murale	25855	0	1,7	0,0	
UHPC _{SCH} -2-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	22905	43616	1,6	3,0	
		Hypnum cupressiforme	22905	549967	1,6	38,4	
		Brachythecium rutabulum	22905	131421	1,6	9,2	
		Rhynchostegium murale	22905	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	23633	32322	1,7	2,3	76
		Hypnum cupressiforme	23633	467054	1,7	33,6	87
		Brachythecium rutabulum	23633	89268	1,7	6,4	70
		Rhynchostegium murale	23633	0	1,7	0,0	
UHPC _{SCH} -3-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	22402	40418	1,6	2,9	
		Hypnum cupressiforme	22402	435051	1,6	31,1	
		Brachythecium rutabulum	22402	0	1,6	0,0	
		Rhynchostegium murale	22402	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	24733	63948	1,7	4,4	152
		Hypnum cupressiforme	24733	550809	1,7	37,9	122
		Brachythecium rutabulum	24733	0	1,7	0,0	
		Rhynchostegium murale	24733	0	1,7	0,0	
N _{SCH} -1	06.06.2018	Amblystegium serpens	21928	73034	1,6	5,3	
		Hypnum cupressiforme	21928	232324	1,6	17,0	
		Brachythecium rutabulum	21928	8967	1,6	0,7	
		Rhynchostegium murale	21928	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	24859	50670	1,7	3,5	65
		Hypnum cupressiforme	24859	291293	1,7	19,9	118
		Brachythecium rutabulum	24859	7833	1,7	0,5	82
		Rhynchostegium murale	24859	0	1,7	0,0	
N _{SCH} -2	06.06.2018	Amblystegium serpens	22128	0	1,6	0,0	
		Hypnum cupressiforme	22128	138611	1,6	10,0	
		Brachythecium rutabulum	22128	0	1,6	0,0	
		Rhynchostegium murale	22128	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	24509	0	1,7	0,0	
		Hypnum cupressiforme	24509	132230	1,7	9,2	92
		Brachythecium rutabulum	24509	0	1,7	0,0	
		Rhynchostegium murale	24509	0	1,7	0,0	
N _{SCH} -3	06.06.2018	Amblystegium serpens	22083	0	1,6	0,0	
		Hypnum cupressiforme	22083	572755	1,6	41,5	
		Brachythecium rutabulum	22083	0	1,6	0,0	
		Rhynchostegium murale	22083	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	24340	0	1,7	0,0	
		Hypnum cupressiforme	24340	561461	1,7	39,2	94
		Brachythecium rutabulum	24340	0	1,7	0,0	
		Rhynchostegium murale	24340	0	1,7	0,0	

Anhang L: Bildanalyse Mooswachstum

Index	Datum	Moosart	Referenzpixel	Moospixel	Breite Zollstab	Fläche [cm ²]	MW _i [%]
N _{SCH} -4	06.06.2018	Amblystegium serpens	21922	145098	1,6	10,6	
		Hypnum cupressiforme	21922	516559	1,6	37,7	
		Brachythecium rutabulum	21922	339102	1,6	24,7	
		Rhynchostegium murale	21922	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	23657	137260	1,7	9,9	93
		Hypnum cupressiforme	23657	476455	1,7	34,2	91
		Brachythecium rutabulum	23657	246143	1,7	17,7	71
		Rhynchostegium murale	23657	0	1,7	0,0	
N _{SCH} -5	06.06.2018	Amblystegium serpens	24922	0	1,6	0,0	
		Hypnum cupressiforme	24922	307046	1,6	19,7	
		Brachythecium rutabulum	24922	0	1,6	0,0	
		Rhynchostegium murale	24922	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	26529	0	1,7	0,0	
		Hypnum cupressiforme	26529	273905	1,7	17,6	89
		Brachythecium rutabulum	26529	0	1,7	0,0	
		Rhynchostegium murale	26529	0	1,7	0,0	
N _{SCH} -6	06.06.2018	Amblystegium serpens	23409	70621	1,6	4,8	
		Hypnum cupressiforme	23409	105476	1,6	7,2	
		Brachythecium rutabulum	23409	0	1,6	0,0	
		Rhynchostegium murale	23409	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	25825	59551	1,7	3,9	81
		Hypnum cupressiforme	25825	82884	1,7	5,5	76
		Brachythecium rutabulum	25825	0	1,7	0,0	
		Rhynchostegium murale	25825	0	1,7	0,0	
N _{SCH} -1-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	0	0	1,6		
		Hypnum cupressiforme	0	0	1,6		
		Brachythecium rutabulum	0	0	1,6		
		Rhynchostegium murale	0	0	1,6		
	05.10.2018	Amblystegium serpens	0	0	1,7		
		Hypnum cupressiforme	0	0	1,7		
		Brachythecium rutabulum	0	0	1,7		
		Rhynchostegium murale	0	0	1,7		
N _{SCH} -2-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	0	0	1,6		
		Hypnum cupressiforme	0	0	1,6		
		Brachythecium rutabulum	0	0	1,6		
		Rhynchostegium murale	0	0	1,6		
	05.10.2018	Amblystegium serpens	0	0	1,7		
		Hypnum cupressiforme	0	0	1,7		
		Brachythecium rutabulum	0	0	1,7		
		Rhynchostegium murale	0	0	1,7		
N _{SCH} -3-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	23018	54736	1,6	3,8	
		Hypnum cupressiforme	23018	216574	1,6	15,1	
		Brachythecium rutabulum	23018	161595	1,6	11,2	
		Rhynchostegium murale	23018	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	24615	34752	1,7	2,4	63
		Hypnum cupressiforme	24615	154589	1,7	10,7	71
		Brachythecium rutabulum	24615	193346	1,7	13,4	119
		Rhynchostegium murale	24615	0	1,7	0,0	

Anhang L: Bildanalyse Mooswachstum

Index	Datum	Moosart	Referenzpixel	Moospixel	Breite Zollstab	Fläche [cm²]	MW,i [%]
N _{SCH} -4-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	21119	70743	1,6	5,4	
		Hypnum cupressiforme	21119	424701	1,6	32,2	
		Brachythecium rutabulum	21119	136835	1,6	10,4	
		Rhynchostegium murale	21119	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	22938	59507	1,7	4,4	82
		Hypnum cupressiforme	22938	369021	1,7	27,3	85
		Brachythecium rutabulum	22938	109104	1,7	8,1	78
		Rhynchostegium murale	22938	0	1,7	0,0	
D _{SCH} -1	06.06.2018	Amblystegium serpens	23578	335444	1,6	22,8	
		Hypnum cupressiforme	23578	938936	1,6	63,7	
		Brachythecium rutabulum	23578	529228	1,6	35,9	
		Rhynchostegium murale	23578	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	24903	291168	1,7	19,9	87
		Hypnum cupressiforme	24903	920603	1,7	62,8	99
		Brachythecium rutabulum	24903	369716	1,7	25,2	70
		Rhynchostegium murale	24903	0	1,7	0,0	
D _{SCH} -2	06.06.2018	Amblystegium serpens	23116	198502	1,6	13,7	
		Hypnum cupressiforme	23116	975329	1,6	67,5	
		Brachythecium rutabulum	23116	529013	1,6	36,6	
		Rhynchostegium murale	23116	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	22273	156786	1,7	12,0	87
		Hypnum cupressiforme	22273	604235	1,7	46,1	68
		Brachythecium rutabulum	22273	593187	1,7	45,3	124
		Rhynchostegium murale	22273	0	1,7	0,0	
D _{SCH} -3	06.06.2018	Amblystegium serpens	23145	246799	1,6	17,1	
		Hypnum cupressiforme	23145	944715	1,6	65,3	
		Brachythecium rutabulum	23145	85810	1,6	5,9	
		Rhynchostegium murale	23145	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	24514	211841	1,7	14,7	86
		Hypnum cupressiforme	24514	955165	1,7	66,2	101
		Brachythecium rutabulum	24514	106753	1,7	7,4	125
		Rhynchostegium murale	24514	0	1,7	0,0	
D _{SCH} -4	06.06.2018	Amblystegium serpens	22306	72447	1,6	5,2	
		Hypnum cupressiforme	22306	886089	1,6	63,6	
		Brachythecium rutabulum	22306	496498	1,6	35,6	
		Rhynchostegium murale	22306	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	23977	51304	1,7	3,6	70
		Hypnum cupressiforme	23977	707511	1,7	50,2	79
		Brachythecium rutabulum	23977	386782	1,7	27,4	77
		Rhynchostegium murale	23977	0	1,7	0,0	
D _{SCH} -1-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	22695	573309	1,6	40,4	
		Hypnum cupressiforme	22695	1009371	1,6	71,2	
		Brachythecium rutabulum	22695	848017	1,6	59,8	
		Rhynchostegium murale	22695	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	23954	399022	1,7	28,3	70
		Hypnum cupressiforme	23954	941631	1,7	66,8	94
		Brachythecium rutabulum	23954	774069	1,7	54,9	92
		Rhynchostegium murale	23954	0	1,7	0,0	

Anhang L: Bildanalyse Mooswachstum

Index	Datum	Moosart	Referenzpixel	Moospixel	Breite Zollstab	Fläche [cm ²]	MW _i [%]
D _{SCH} -2-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	22884	387739	1,6	27,1	
		Hypnum cupressiforme	22884	618319	1,6	43,2	
		Brachythecium rutabulum	22884	880506	1,6	61,6	
		Rhynchostegium murale	22884	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	23290	351887	1,7	25,7	95
		Hypnum cupressiforme	23290	592411	1,7	43,2	100
		Brachythecium rutabulum	23290	940724	1,7	68,7	112
		Rhynchostegium murale	23290	0	1,7	0,0	
D _{SCH} -3-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	22606	593488	1,6	42,0	
		Hypnum cupressiforme	22606	813159	1,6	57,6	
		Brachythecium rutabulum	22606	608530	1,6	43,1	
		Rhynchostegium murale	22606	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	23616	337509	1,7	24,3	58
		Hypnum cupressiforme	23616	739389	1,7	53,2	92
		Brachythecium rutabulum	23616	555365	1,7	40,0	93
		Rhynchostegium murale	23616	0	1,7	0,0	
D _{SCH} -4-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	22889	394792	1,6	27,6	
		Hypnum cupressiforme	22889	261595	1,6	18,3	
		Brachythecium rutabulum	22889	934845	1,6	65,3	
		Rhynchostegium murale	22889	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	23423	278906	1,7	20,2	73
		Hypnum cupressiforme	23423	196435	1,7	14,3	78
		Brachythecium rutabulum	23423	906188	1,7	65,8	101
		Rhynchostegium murale	23423	0	1,7	0,0	
S _{SCH} -1-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	22301	218190	1,6	15,7	
		Hypnum cupressiforme	22301	1428820	1,6	102,5	
		Brachythecium rutabulum	22301	597341	1,6	42,9	
		Rhynchostegium murale	22301	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	25122	183968	1,7	12,4	80
		Hypnum cupressiforme	25122	1281317	1,7	86,7	85
		Brachythecium rutabulum	25122	777428	1,7	52,6	123
		Rhynchostegium murale	25122	0	1,7	0,0	
S _{SCH} -2-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	22475	438085	1,6	31,2	
		Hypnum cupressiforme	22475	729925	1,6	52,0	
		Brachythecium rutabulum	22475	524623	1,6	37,3	
		Rhynchostegium murale	22475	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	24300	195959	1,7	13,7	44
		Hypnum cupressiforme	24300	523549	1,7	36,6	70
		Brachythecium rutabulum	24300	456501	1,7	31,9	86
		Rhynchostegium murale	24300	0	1,7	0,0	
S _{SCH} -3-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	22440	502226	1,6	35,8	
		Hypnum cupressiforme	22440	748056	1,6	53,3	
		Brachythecium rutabulum	22440	790785	1,6	56,4	
		Rhynchostegium murale	22440	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	24345	279944	1,7	19,5	55
		Hypnum cupressiforme	24345	542549	1,7	37,9	71
		Brachythecium rutabulum	24345	809259	1,7	56,5	100
		Rhynchostegium murale	24345	0	1,7	0,0	

Anhang L: Bildanalyse Mooswachstum

Index	Datum	Moosart	Referenzpixel	Moospixel	Breite Zollstab	Fläche [cm ²]	MW,i [%]
S _{SCH} -4-K	06.06.2018	Amblystegium serpens	22470	0	1,6	0,0	
		Hypnum cupressiforme	22470	0	1,6	0,0	
		Brachythecium rutabulum	22470	0	1,6	0,0	
		Rhynchostegium murale	22470	0	1,6	0,0	
	05.10.2018	Amblystegium serpens	24574	40506	1,7	2,8	
		Hypnum cupressiforme	24574	36976	1,7	2,6	
		Brachythecium rutabulum	24574	235172	1,7	16,3	
		Rhynchostegium murale	24574	0	1,7	0,0	

Anhang M: Betonfeuchtemessung Auslagerung

Schattige Lagerung						Sonnige Lagerung					
Datum: 20.06.2018						Datum: 20.06.2018					
Oberseite						Oberseite					
Probe:	Feuchtemessung [%]				Mittelwert	Probe:	Feuchtemessung [%]				Mittelwert
	Linkes	Rechtes	Oben	Unten			Linkes	Rechtes	Oben	Unten	
U _{SCH-K,1}	2,9	1,9	2,7	3,9	2,9	U _{SO-K,1}	3,0	2,7	3,1	3,0	3,0
U _{SCH-K,2}	2,7	3,3	2,8	2,8	2,9	U _{SO-K,2}	2,6	2,7	3,0	2,2	2,6
U _{SCH-K,3}	2,6	2,7	2,1	2,5	2,5	U _{SO-K,3}	2,9	2,6	2,8	2,8	2,8
N _{SCH,1}	1,8	2,4	2,2	3,1	2,4	N _{SO,1}	1,9	1,8	1,2	1,0	1,5
N _{SCH,2}	2,4	1,3	3,4	2,8	2,5	N _{SO,2}	1,8	1,3	1,7	1,7	1,6
N _{SCH,3}	3,1	3,0	3,3	2,5	3,0	N _{SO,3}	2,0	1,7	1,6	2,0	1,8
N _{SCH,4}	2,9	2,0	3,2	2,6	2,7	N _{SO,4}	1,9	2,1	2,1	1,7	2,0
N _{SCH,5}	1,8	2,6	1,8	1,3	1,9	N _{SO,5}	0,9	0,7	0,8	1,3	0,9
N _{SCH,6}	1,2	0,7	1,7	1,5	1,3	N _{SO,6}	0,6	0,6	0,8	0,4	0,6
D _{SCH,1}	1,0	2,1	1,7	1,3	1,5	D _{SO,1}	0,1	1,0	0,3	0,1	0,4
D _{SCH,2}	2,0	2,0	2,9	1,7	2,2	D _{SO,2}	0,2	0,1	0,0	0,2	0,1
D _{SCH,3}	2,3	1,5	1,9	2,3	2,0	D _{SO,3}	0,3	0,2	0,1	0,4	0,3
D _{SCH,4}	1,7	1,7	1,9	1,6	1,7	D _{SO,4}	0,6	0,9	0,6	0,5	0,7
N _{SCH-K,1}	0,9	1,7	1,0	1,1	1,2	N _{SO-K,1}	2,2	2,0	1,8	2,0	2,0
N _{SCH-K,2}	2,1	1,3	1,5	1,5	1,6	N _{SO-K,2}	1,6	1,6	2,0	1,3	1,6
N _{SCH-K,3}	3,4	1,8	2,9	2,8	2,7	N _{SO-K,3}	2,2	1,5	2,1	1,8	1,9
N _{SCH-K,4}	1,9	1,7	1,7	1,8	1,8	N _{SO-K,4}	1,7	2,0	1,6	1,3	1,7
D _{SCH-K,1}	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	D _{SO-K,1}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
D _{SCH-K,2}	0,4	0,7	0,5	0,5	0,5	D _{SO-K,2}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
D _{SCH-K,3}	0,5	0,4	1,0	0,3	0,6	D _{SO-K,3}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
D _{SCH-K,4}	1,3	0,6	0,7	1,0	0,9	D _{SO-K,4}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
S _{SCH-K,1}	1,7	1,4	1,5	0,5	1,3	S _{SO-K,1}	0,9	0,8	1,0	1,2	1,0
S _{SCH-K,2}	1,7	1,8	1,0	1,8	1,6	S _{SO-K,2}	1,3	1,5	0,8	1,0	1,2
S _{SCH-K,3}	1,2	2,5	1,7	1,4	1,7	S _{SO-K,3}	1,2	1,2	1,0	1,1	1,1
S _{SCH-K,4}	1,0	1,3	0,9	1,7	1,2	S _{SO-K,4}	1,2	0,9	1,4	1,5	1,3

Anhang M: Betonfeuchtemessung Auslagerung

Schattige Lagerung		Sonnige Lagerung					
Datum: 05.07.2018		Datum: 05.07.2018					
Oberseite		Oberseite					
Probe:	Feuchtemessung	Feuchtemessung [%]				Mittelwert	
		Linkes	Rechtes	Oben	Unten		
USCH-K,1	2,8	USO-K,1	3,0	3,6	3,1	3,0	3,2
USCH-K,2	3	USO-K,2	2,9	2,9	3,2	3,1	3,0
USCH-K,3	2,6	USO-K,3	2,8	3,0	2,7	3,0	2,9
NSCH,1	2,6	NSO,1	2,6	2,4	1,6	2,4	2,3
NSCH,2	2,1	NSO,2	1,6	1,2	1,8	1,7	1,6
NSCH,3	2,6	NSO,3	2,6	2,3	2,7	2,1	2,4
NSCH,4	3,2	NSO,4	2,3	2,2	2,3	1,9	2,2
NSCH,5	2,0	NSO,5	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9
NSCH,6	1,6	NSO,6	0,4	0,6	0,9	1,1	0,8
DSCH,1	1,8	DSO,1	0,4	0,6	0,1	0,1	0,3
DSCH,2	2,0	DSO,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2
DSCH,3	2,5	DSO,3	0,4	0,6	0,3	0,1	0,4
DSCH,4	2,1	DSO,4	1,4	0,8	0,4	1,0	0,9
NSCH-K,1	1,8	NSO-K,1	2,4	2,4	2,3	2,2	2,3
NSCH-K,2	1,9	NSO-K,2	2,1	2,2	2,6	2,0	2,2
NSCH-K,3	2,5	NSO-K,3	2,1	2,1	2,3	2,4	2,2
NSCH-K,4	2,6	NSO-K,4	2,2	2,3	2,5	2,1	2,3
Dsch-K,1	0,9	DSO-K,1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,1
Dsch-K,2	1,7	DSO-K,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Dsch-K,3	1,3	DSO-K,3	0,0	0,2	0,2	0,1	0,1
Dsch-K,4	1,2	DSO-K,4	0,2	0,4	0,1	0,0	0,2
SSCH-K,1	2,4	SSO-K,1	1,2	1,3	1,0	1,9	1,4
SSCH-K,2	2,0	SSO-K,2	1,5	1,4	1,5	1,8	1,6
SSCH-K,3	2,0	SSO-K,3	1,5	1,9	2,1	1,7	1,8
SSCH-K,4	2,2	SSO-K,4	0,6	1,3	0,8	1,7	1,1

Unterseite		Unterseite	
Probe:	Feuchtemessung [%]	Probe:	Feuchtemessung [%]
USCH-K,1	4	USO-K,1	4,5
USCH-K,2	4	USO-K,2	4,4
USCH-K,3	3,9	USO-K,3	4,4
NSCH,1	5,7	NSO,1	5,4
NSCH,2	5,1	NSO,2	5,4
NSCH,3	5,9	NSO,3	5,6
NSCH,4	5,6	NSO,4	5,1
NSCH,5	6,3	NSO,5	4,8
NSCH,6	4,5	NSO,6	6,1
DSCH,1	3,5	DSO,1	3,2
DSCH,2	4,0	DSO,2	3,2
DSCH,3	4,2	DSO,3	3,6
DSCH,4	3,0	DSO,4	2,8
NSCH-K,1	4,2	NSO-K,1	4,2
NSCH-K,2	4,5	NSO-K,2	4,2
NSCH-K,3	4,4	NSO-K,3	4,7
NSCH-K,4	3,9	NSO-K,4	4,1
Dsch-K,1	2,6	DSO-K,1	1,9
Dsch-K,2	3,0	DSO-K,2	3,0
Dsch-K,3	2,5	DSO-K,3	2,3
Dsch-K,4	2,6	DSO-K,4	2,6
SSCH-K,1	2,5	SSO-K,1	3,3
SSCH-K,2	3,2	SSO-K,2	3,0
SSCH-K,3	2,8	SSO-K,3	3,2
SSCH-K,4	2,8	SSO-K,4	3,3

Anhang M: Betonfeuchtigkeitsmessung Auslagerung

Schattige Lagerung						Sonnige Lagerung					
Datum: 24.07.2018						Datum: 24.07.2018					
Oberseite						Oberseite					
Probe:	Feuchtemessung [%]				Mittelwert	Probe:	Feuchtemessung [%]				Mittelwert
	Linkes	Rechtes	Oben	Unten			Linkes	Rechtes	Oben	Unten	
U _{SCH-K,1}	3,5	3,3	3,6	3,4	3,5	U _{SO-K,1}	3,2	3,0	3,1	2,8	3,0
U _{SCH-K,2}	3,4	4,2	3,9	3,0	3,6	U _{SO-K,2}	3,4	3,3	3,0	3,2	3,2
U _{SCH-K,3}	4,3	4,1	3,7	3,2	3,8	U _{SO-K,3}	3,0	3,1	3,0	3,0	3,0
N _{SCH,1}	3,2	3,7	4,7	3,4	3,8	N _{SO,1}	2,6	2,7	2,8	2,7	2,7
N _{SCH,2}	4,6	4,3	3,6	4,3	4,2	N _{SO,2}	2,6	2,8	2,6	2,5	2,6
N _{SCH,3}	3,9	3,8	4,5	3,7	4,0	N _{SO,3}	2,4	2,5	2,7	2,1	2,4
N _{SCH,4}	4,8	4,8	5,1	4,7	4,9	N _{SO,4}	2,7	2,6	2,5	2,6	2,6
N _{SCH,5}	3,7	3,2	4,6	3,5	3,8	N _{SO,5}	1,1	1,5	1,5	0,8	1,2
N _{SCH,6}	1,7	2,1	2,7	1,9	2,1	N _{SO,6}	1,2	1,5	1,0	0,8	1,1
D _{SCH,1}	4,3	5,3	5,2	4,6	4,9	D _{SO,1}	2,0	2,3	2,2	2,2	2,2
D _{SCH,2}	4,4	5,4	5,3	4,4	4,9	D _{SO,2}	2,2	2,2	1,7	2,1	2,1
D _{SCH,3}	5,3	4,3	4,9	4,8	4,8	D _{SO,3}	2,1	2,1	2,3	1,9	2,1
D _{SCH,4}	2,4	2,9	2,8	2,7	2,7	D _{SO,4}	3,5	3,3	3,2	3,7	3,4
N _{SCH-K,1}	3,0	2,5	2,1	2,5	2,5	N _{SO-K,1}	2,5	2,6	2,5	2,5	2,5
N _{SCH-K,2}	2,0	2,6	2,7	1,6	2,2	N _{SO-K,2}	2,6	2,4	2,6	2,1	2,4
N _{SCH-K,3}	5,0	4,3	4,7	4,4	4,6	N _{SO-K,3}	2,5	2,6	2,4	2,6	2,5
N _{SCH-K,4}	3,1	3,4	3,4	3,6	3,4	N _{SO-K,4}	2,6	2,5	2,5	2,4	2,5
D _{SCH-K,1}	3,3	2,9	4,2	2,3	3,2	D _{SO-K,1}	2,0	2,0	1,9	1,8	1,9
D _{SCH-K,2}	4,3	4,6	4,5	3,7	4,3	D _{SO-K,2}	2,1	2,0	2,2	3,0	2,3
D _{SCH-K,3}	3,4	4,1	4,4	3,1	3,8	D _{SO-K,3}	2,4	2,2	2,1	2,1	2,2
D _{SCH-K,4}	4,3	4,7	5,1	4,1	4,6	D _{SO-K,4}	2,1	2,1	1,5	2,0	1,9
S _{SCH-K,1}	6,2	6,6	6,7	6,2	6,4	S _{SO-K,1}	3,1	3,0	3,6	3,4	3,3
S _{SCH-K,2}	5,4	5,6	5,3	5,3	5,4	S _{SO-K,2}	3,4	3,3	3,6	3,0	3,3
S _{SCH-K,3}	4,2	3,8	4,0	3,8	4,0	S _{SO-K,3}	3,3	3,2	3,4	3,3	3,3
S _{SCH-K,4}	1,9	2,0	2,3	1,8	2,0	S _{SO-K,4}	3,7	3,5	4,0	3,7	3,7

Unterseite		Unterseite	
Probe:	Feuchtemessung [%]	Probe:	Feuchtemessung [%]
U _{SCH-K,1}	5	U _{SO-K,1}	4,3
U _{SCH-K,2}	4,3	U _{SO-K,2}	4,1
U _{SCH-K,3}	5,4	U _{SO-K,3}	4
N _{SCH,1}	6,9	N _{SO,1}	5,6
N _{SCH,2}	5,8	N _{SO,2}	6,9
N _{SCH,3}	6,7	N _{SO,3}	5,4
N _{SCH,4}	6,9	N _{SO,4}	5,3
N _{SCH,5}	6,9	N _{SO,5}	6,2
N _{SCH,6}	6,9	N _{SO,6}	5,7
D _{SCH,1}	4,5	D _{SO,1}	4,5
D _{SCH,2}	4,4	D _{SO,2}	3,9
D _{SCH,3}	4,5	D _{SO,3}	5,1
D _{SCH,4}	3,4	D _{SO,4}	3,4
N _{SCH-K,1}	4,2	N _{SO-K,1}	5,0
N _{SCH-K,2}	4,7	N _{SO-K,2}	4,7
N _{SCH-K,3}	4,1	N _{SO-K,3}	5,3
N _{SCH-K,4}	4,4	N _{SO-K,4}	4,9
D _{SCH-K,1}	3,9	D _{SO-K,1}	3,5
D _{SCH-K,2}	3,9	D _{SO-K,2}	4,0
D _{SCH-K,3}	4,2	D _{SO-K,3}	3,9
D _{SCH-K,4}	4,5	D _{SO-K,4}	3,7
S _{SCH-K,1}	4,7	S _{SO-K,1}	4,1
S _{SCH-K,2}	4,2	S _{SO-K,2}	4,2
S _{SCH-K,3}	3,7	S _{SO-K,3}	4,0
S _{SCH-K,4}	3,4	S _{SO-K,4}	4,3

Anhang M: Betonfeuchtigkeitsmessung Auslagerung

Schattige Lagerung						Sonnige Lagerung					
Datum: 05.10.2018						Datum: 05.10.2018					
Oberseite						Oberseite					
Probe:	Feuchtemessung [%]				Mittelwert	Probe:	Feuchtemessung [%]				Mittelwert
	Linkes	Rechtes	Oben	Unten			Linkes	Rechtes	Oben	Unten	
USCH-K,1	2,8	2,7	3,0	3,1	2,9	USO-K,1	3,0	3,4	3,3	3,2	3,2
USCH-K,2	2,8	3,7	3,3	3,1	3,2	USO-K,2	3,1	3,2	3,2	3,3	3,2
USCH-K,3	2,8	3,1	3,0	3,0	3,0	USO-K,3	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0
NSCH,1	2,2	2,6	2,5	2,7	2,5	NSO,1	1,8	2,3	2,4	1,8	2,1
NSCH,2	2,4	2,7	2,5	2,4	2,5	NSO,2	2,5	2,4	2,5	2,2	2,4
NSCH,3	2,6	2,4	2,6	2,6	2,6	NSO,3	1,8	2,4	2,4	1,6	2,1
NSCH,4	2,4	2,6	2,7	2,1	2,5	NSO,4	2,3	2,5	2,6	2,1	2,4
NSCH,5	1,5	1,3	1,8	1,7	1,6	NSO,5	1,2	1,3	1,3	1,4	1,3
NSCH,6	1,1	1,2	1,3	1,2	1,2	NSO,6	1,1	1,2	1,4	1,3	1,3
DSCH,1	1,8	1,7	1,5	1,5	1,6	DSO,1	0,9	1,1	1,1	0,9	1,0
DSCH,2	2,0	1,6	1,5	1,5	1,7	DSO,2	0,7	1,0	0,7	0,9	0,8
DSCH,3	1,7	1,3	1,8	1,6	1,6	DSO,3	1,0	0,6	0,8	0,7	0,8
DSCH,4	1,3	1,7	1,5	1,5	1,5	DSO,4	1,7	1,4	1,3	1,4	1,5
NSCH-K,1	2,1	2,2	2,3	2,5	2,3	NSO-K,1	2,1	2,2	2,5	2,4	2,3
NSCH-K,2	2,3	2,4	2,4	2,3	2,4	NSO-K,2	2,4	2,3	2,3	2,2	2,3
NSCH-K,3	2,5	2,1	2,3	2,2	2,3	NSO-K,3	2,7	2,3	2,5	2,3	2,5
NSCH-K,4	2,6	2,5	2,2	2,1	2,4	NSO-K,4	2,4	2,4	2,2	2,2	2,3
Dsch-K,1	1,3	1,2	1,1	1,0	1,2	DSO-K,1	0,4	0,6	0,8	0,5	0,6
Dsch-K,2	1,5	1,4	1,2	1,2	1,3	DSO-K,2	0,7	0,9	1,0	0,6	0,8
Dsch-K,3	1,0	1,0	1,2	1,2	1,1	DSO-K,3	0,7	0,7	0,8	0,6	0,7
Dsch-K,4	1,1	1,2	1,1	1,2	1,2	DSO-K,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
SSCH-K,1	2,1	1,8	1,7	1,8	1,9	Sso-K,1	1,6	1,9	1,7	2,0	1,8
SSCH-K,2	2,0	2,1	2,2	1,8	2,0	Sso-K,2	1,7	2,0	1,7	2,0	1,9
SSCH-K,3	1,9	1,5	2,0	1,9	1,8	Sso-K,3	1,7	1,6	1,7	1,5	1,6
SSCH-K,4	1,7	1,7	2,0	1,6	1,8	Sso-K,4	1,6	1,7	1,6	1,5	1,6

Unterseite		Unterseite	
Probe:	Feuchtemessung [%]	Probe:	Feuchtemessung [%]
USCH-K,1	4,3	USO-K,1	4,8
USCH-K,2	4,3	USO-K,2	4
USCH-K,3	4,1	USO-K,3	4,1
NSCH,1	5,3	NSO,1	6,5
NSCH,2	6,3	NSO,2	5,5
NSCH,3	6,3	NSO,3	4,1
NSCH,4	6,5	NSO,4	4,8
NSCH,5	5,9	NSO,5	4,6
NSCH,6	5,2	NSO,6	6,5
DSCH,1	3,8	DSO,1	3,1
DSCH,2	4,2	DSO,2	3,4
DSCH,3	4,2	DSO,3	3,4
DSCH,4	4,3	DSO,4	2,3
NSCH-K,1	4,7	NSO-K,1	5,1
NSCH-K,2	4,7	NSO-K,2	4,9
NSCH-K,3	4,8	NSO-K,3	4,8
NSCH-K,4	4,2	NSO-K,4	2,8
Dsch-K,1	3,1	DSO-K,1	2,7
Dsch-K,2	3,2	DSO-K,2	2,8
Dsch-K,3	3,3	DSO-K,3	2,7
Dsch-K,4	3,4	DSO-K,4	2,4
SSCH-K,1	3,5	Sso-K,1	2,7
SSCH-K,2	3,4	Sso-K,2	3,1
SSCH-K,3	3,4	Sso-K,3	3,0
SSCH-K,4	3,2	Sso-K,4	2,7