

KLOSTERMANN

Heinrich Klostermann GmbH & Co. KG Betonwerke

Projektleiter: Dipl.-Betw. Peter Klostermann

Am Wasserturm 20, 48653 Coesfeld

Tel.: 02541 / 749-35; Fax: 02541 / 749-39

E-Mail: pk1@klostermann-beton.de

Internet: www.klostermann-beton.de

Entwicklung wasserdurchlässiger und verdunstungsfähiger Pflasterstein-Beläge zum Vermeiden von Niederschlagsabflüssen und zur Erhöhung der Evaporation im urbanen Raum (1. Phase)

Ergänzende Untersuchungen zur Optimierung wasserdurchlässiger Pflasterstein-Beläge als Beitrag zur Erhöhung der Evaporation im urbanen Raum (2. Phase)

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 23277 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



von

Dipl.-Betw. Peter Klostermann

Prof. Dr. Wilhelm Georg Coldewey

PD Dr. Patricia Göbel

Coesfeld, März 2012

Bezugsmöglichkeiten des Abschlussberichtes:

Heinrich Klostermann GmbH & Co. KG Betonwerke

Projektleiter: Dipl.-Betw. Peter Klostermann

Am Wasserturm 20, 48653 Coesfeld

Tel.: 02541 / 749-35; Fax: 02541 / 749-39

E-Mail: pk1@klostermann-beton.de

Internet: www.klostermann-beton.de

Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Kooperationspartner: Prof. Dr. Wilhelm G. Coldewey (Phase I)

E-Mail: coldewey@uni-muenster.de

PD Dr. Patricia Göbel (Phase II)

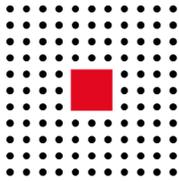
Institut für Geologie und Paläontologie

Corrensstr. 24, 48149 Münster

Tel.: 0251 / 83-36173, Fax: 0251 / 83-33533

E-Mail: pgoebel@uni-muenster.de

Internet: umweltgeo@uni-muenster.de



KLOSTERMANN

Heinrich Klostermann GmbH & Co. KG Betonwerke

Projektleiter: Dipl.-Betw. Peter Klostermann

Am Wasserturm 20, 48653 Coesfeld

Tel.: 02541 / 749-35; Fax: 02541 / 749-39

E-Mail: pk1@klostermann-beton.de

Internet: www.klostermann-beton.de

Entwicklung wasserdurchlässiger und verdunstungsfähiger Pflasterstein-Beläge zum Vermeiden von Niederschlagsabflüssen und zur Erhöhung der Evaporation im urbanen Raum (1. Phase)

Ergänzende Untersuchungen zur Optimierung wasserdurchlässiger Pflasterstein-Beläge als Beitrag zur Erhöhung der Evaporation im urbanen Raum (2. Phase)

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 23277 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



von

Dipl.-Betw. Peter Klostermann

Prof. Dr. Wilhelm Georg Coldewey

PD Dr. Patricia Göbel

Coesfeld, Februar 2012

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	23277/01 + /02	Referat	23	Fördersumme	121.403,00 € + 43.645 €
Antragstitel		Entwicklung wasserdurchlässiger und verdunstungsfähiger Pflasterstein-Beläge zum Vermeiden von Niederschlagsabflüssen und zur Erhöhung der Evaporation im urbanen Raum (1. Phase)			
		Ergänzende Versuche zur Optimierung wasserdurchlässiger Pflasterstein-Beläge als Beitrag zur Erhöhung der Evaporation im urbanen Raum (2. Phase)			
Stichworte		Produkt, Baustoff, Regenwasser			
	Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
	4 Jahre	27.11.2007	17.12.2011	2	
	Zwischenberichte	keine			
Bewilligungsempfänger		Heinrich Klostermann GmbH & Co. KG Betonwerke Am Wasserturm 20 48653 Coesfeld		Tel	02541 / 749-35
				Fax	02541 / 749-39
				Projektleitung Dipl.-Betw. P. Klostermann	
				Bearbeiter Dipl.-Ing. (FH) Annette Voß	
Kooperationspartner		Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Abteilung Angewandte Geologie Prof. Dr. Wilhelm G. Coldewey, PD Dr. Patricia Göbel Corrensstr. 24, 48149 Münster, 0251 / 83-36173			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
Ziel des vorliegenden Antrages war es, die Eigenschaften der wasserdurchlässig gestalteten Flächenbefestigung (Aufbau und Zusammensetzung der Trag- und Bettungsschicht, Aufbau und Zusammensetzung des Pflastersteins, Fugenweite und -füllung, etc.) im Rahmen der geltenden Regelungen und Vorschriften und unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte insofern zu variieren bzw. zu optimieren, dass die Verdunstungsrate entsprechend groß und gleichmäßig ausfällt.					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
Nach einer Marktanalyse der verfügbaren Mineralstoffe wurden 19 verschiedene Mineralstoffe zur Verwendung als Tragschicht, Bettungsschicht oder Fügenfüllung hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht und fünf unterschiedliche Straßenaufbauten festgelegt. Im Labor wurden 25 Prototypen von Pflastersteinen entwickelt, die hinsichtlich des Aufbaus und der Zusammensetzung variieren. Die Variationen im Aufbau beziehen sich bei konstant einzustellenden Pflastersteinhöhen auf die Schichtigkeit (Vorsatz- und Kernbeton) sowie die Mächtigkeit der Vorsatzschicht; hinsichtlich der Zusammensetzung wurden Zementart, Wasserzementwert, Porenvolumen bezogen auf den Rohgehalt, Gesteinskörnung (Kornform, Korngröße [minimale Korngröße, maximale Korngröße, Korngrößendifferenz], Kornmaterial) und Farbe durch unterschiedliche Beimengungen variiert. Alle Prototypen wurden hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht und die Ergebnisse statistisch ausgewertet. Parallel zu diesen Laboruntersuchungen wurde basierend auf den Ergebnissen der Vorerkundung der Geländeversuch geplant, vorbereitet, aufgebaut, Feldmessgeräte installiert und die Messfelder geprüft. Für den ersten Geländeversuch wurden überwiegend marktübliche Straßenaufbauten verwendet und der Einfluss unterschiedlicher Tragschichten, der Pflastersteinfarben, der Vegetation und der Wasserdurchlässigkeit des Pflastersteins untersucht. Im zweiten Geländeversuch wurden verdunstungsoptimierte Pflasterstein-Prototypen eingesetzt und der Einfluss der vollständigen Versiegelung durch abgedichtete Fugen und Asphaltierung untersucht. Zum Ende des zweiten Geländeversuches wurden auf den einzelnen Messfeldern der Versickerungsvorgang und die Wärmestrahlung der Felder untersucht sowie eine Hochwassersituation und „clogging“-Effekte simuliert. Während der Versuchszeit wurden kontinuierlich die Klimadaten Niederschlag, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit im „Tunnel“-Verdunstungsmesser und zeitweise Globalstrahlung gemessen und daraus die aktuelle Verdunstung sowie die Grasreferenzverdunstung abgeleitet. Alle erhobenen Daten fanden Eingang in die Berechnung der Wasserbilanz im urbanen Raum. Zum Abschluss erfolgte eine betriebswirtschaftliche Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten von wasserdurchlässigen Befestigungen von Verkehrsflächen und deren Entwässerungsanlagen.					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Die 19 verschiedenen Mineralstoffe erfüllen in fast allen Eigenschaften die Anforderungen im Straßenbau. Eine Variation der Mineralstoffe der Trag- und Bettungsschicht hat keinen Einfluss auf die Verdunstung im Gelände. Allerdings ist der wasserdurchlässig gestaltete Straßenaufbau mit einer 0,50 m mächtigen Tragschicht in der Lage, 65 l/m² bis 96 l/m² Regenwasser aufzunehmen. Der weitere Versickerungsprozess ist abhängig vom Durchlässigkeitsbeiwert des natürlichen Untergrundes. Für einen Untergrund aus einem mittleren Sand ergibt sich auch bei einem einfachen Bemessungsregen mit 26,2 mm in 10 min [Bemessungsregen $I_{10(0,2)}$ mit 1,62 l/(min·m²)] ein ausreichendes Restvolumen für ein nachfolgendes Regenereignis und/oder zur Ankopplung weiterer versiegelter Flächen (Erhöhung des Anschlussverhältnisses auf 1:4,5). Eine Variation der Mineralstoffe der Fugenfüllung hat einen großen Einfluss auf die Verdunstung. Das Extensivsubstrat zeigt im Labor ähnlich hohe Verdunstungswerte wie ein natürlicher Boden. Der Versickerungsprozess findet auch bei einem haufwerksporigen Betonpflasterstein nach wie vor über die Fuge statt; die wenigen durchgängig offenen Poren der haufwerksporigen Betonpflastersteine leiten das Regenwasser zum überwiegenden Teil über seitlich austretende Porenöffnungen in tiefere Bereiche der Fuge, sodass ein oberflächennahes Zusetzen der Fugen und Poren durch Feinstaub („clogging“) nicht zwangsläufig eine komplette Aufhebung der Versickerungsleistung bedeutet. Eine Variation der Eigenschaften der Pflastersteine hat die größten Auswirkungen auf die Verdunstung. Von 25 verschiedenen Prototypen zeigen die zweischichtigen Pflastersteine, bei denen die inneren Oberflächen durch auftreffendes Wasser möglichst stark benetzt werden, die höchsten Verdunstungsraten im Labor. Der verdunstungsoptimierte Pflasterstein sollte aus einer feinkörnigen, nicht oder kaum rauen, wasserdurchlässigen Vorsatzschicht und einem grobkörnigen, ebenfalls wasserdurchlässigen Kernbeton bestehen. Um die Verdunstungsraten weiter anzuheben, sollten möglichst Anthrazit gefärbte Pflastersteine sowie die Zementart CEM I verwendet werden, da diese scheinbar mehr Wasser für die spätere Verdunstung halten und die thermischen Eigenschaften beeinflussen können. Alle Prototypen, die eine hohe Verdunstung zeigen, sind ebenso charakterisiert durch eine deutliche Differenz zwischen Temperaturleitfähigkeiten im gesättigten und trockenen Zustand, welche durch ebenfalls große Variationen in der Wärmeleitfähigkeit hervorgerufen werden. Dieser Effekt ist besonders deutlich beim Prototyp Tm mit einer 2 cm starken feinkörnigen Vorsatzschicht. Im Zuge des Vorhabens wurde erstmalig die aktuelle Verdunstung ausgewählter Pflasterstein-Beläge direkt im Gelände gemessen. Gegenüber einem gefügedichteten Pflasterstein (62 mm/a, 7 % des Jahresniederschlages) zeigte eine wasserdurchlässig gestaltete Pflasterfläche mit dem bereits erhältlichen Pflasterstein geoSTON[®] protect grau eine 1,4-fach höhere Verdunstung (88 mm/a). Die im Vorhaben optimierten Pflastersteinprototypen zeigten im Durchschnitt eine beinahe 2,4-fach höhere Verdunstungsrate (149 mm/a, 18 % des Jahresniederschlages). Rasengittersteine zeigten im Vergleich dazu eine mehr als 8-fach höhere Verdunstung (545 mm/a, 65 % des Jahresniederschlages). Die verdunstungsoptimierten Pflasterstein-Belägen zeigten darüber hinaus eine gleichmäßigere Verdunstung nach einem Starkregenereignis. Die Wasserhaushaltsbilanzierung einer Stadt ergab, dass in repräsentativen Bebauungsgebieten der Einsatz von wasserdurchlässigen und verdunstungsoptimierten Pflastersteinen eine Erhöhung der urbanen Evapotranspirationsraten von 25,9 mm/a bis zu 44,9 mm/a bewirken. Das entspricht einem zusätzlich verdunsteten Wasservolumen von 630.000 m³/a bis zu 1.040.000 m³/a. Damit lässt sich eine Abkühlung der „Wärmeinsel“ Stadt in den unteren 2 m Luftschichten des repräsentativen Bebauungsgebietes um ungefähr 0,4°C erreichen. Die ökonomischen Betrachtungen zeigten, dass eine Bauweise nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) mit geoSTON[®] protect in 8 cm Stärke sinnvoll ist. Zum einen sind die Investitionskosten mit ca. 2.000 € günstiger als die Standard-Ausführung mit gefügedichtem Rechteckpflaster 20/10/8 cm und zum anderen entfallen bei einer Bauweise nach abZ die Entwässerungsgebühren mit ca. 0,56 €/Jahr·m².

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Im Laufe des Vorhabens wurden 9 Bachelor-, 2 Master-/Diplom- und eine Doktorarbeit erstellt. Die Ergebnisse des Vorhabens wurden auf 17 internationalen/nationalen Tagungen und 3 Messebeteiligungen in Form von Vorträgen (13) und Postern (7) sowie zahlreichen Besuchern der Untersuchungsfläche präsentiert.

Fazit

Bei einer großräumigen Verwendung der verdunstungsoptimierten Produkte im urbanen Raum lässt sich eine Reduzierung von Hochwasserabflüssen, eine Unterstützung der Grundwasserneubildung in stark versiegelten Gebieten sowie eine tendenzielle Abkühlung der Wärmeinsel Stadt erreichen. Die derzeit bundesweit verwendeten Abflussbeiwerte müssen auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse angepasst werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	6
1 Zusammenfassung.....	24
2 Einleitung.....	25
3 Entwicklung verdunstungsoptimierter Pflastersteine.....	30
3.1 Laborversuche an Lockermaterialien.....	30
3.1.1 Korngrößenverteilung.....	31
3.1.2 Über- und Unterkornanteile.....	32
3.1.3 Feinanteil.....	32
3.1.4 Kornform.....	33
3.1.5 Kornoberfläche.....	34
3.1.6 Filterstabilität.....	35
3.1.7 Korndichte.....	37
3.1.8 Proctordichte.....	38
3.1.9 Wasserdurchlässigkeit.....	39
3.1.10 Wasseraufnahme- und Wasserhaltevermögen.....	42
3.1.11 Kapillare Steighöhe.....	44
3.1.12 Prüfung der Frostsicherheit.....	46
3.1.13 Saugspannung.....	46
3.1.14 Thermische Eigenschaft.....	50
3.1.15 Verdunstung.....	53
3.2 Laborversuche an Pflasterstein-Belägen.....	54
3.2.1 Festigkeit.....	59
3.2.2 Porenanteil, Porenzahl, Korndichte, Trockendichte.....	60
3.2.3 Porensystem.....	63
3.2.4 Maximale Rauigkeit.....	67
3.2.5 Benetzbarkeit.....	69
3.2.6 Wasserdurchlässigkeit.....	72
3.2.7 Wasseraufnahmevermögen.....	77
3.2.8 Wasserhaltevermögen.....	78
3.2.9 Frostprüfung.....	80
3.2.10 Saugspannung.....	80
3.2.11 Thermische Eigenschaft.....	82

3.2.12	Verdunstung.....	84
3.2.13	Korrelationsanalyse.....	89
3.2.14	Statistische Untersuchung.....	93
4	Geländeversuche.....	102
4.1	Beschreibung der Untersuchungsfläche in Coesfeld.....	102
4.1.1	Geographische Lage und naturräumliche Einordnung.....	102
4.1.2	Klima.....	103
4.2	Vorerkundung des Untergrundes der Untersuchungsfläche.....	103
4.2.1	Untersuchung des anstehenden Untergrundes.....	103
4.2.2	Ermittlung des Flurabstandes.....	105
4.2.3	Ermittlung der Infiltrationsrate des anstehenden Untergrundes.....	106
4.3	Genereller Versuchsaufbau.....	107
4.4	Versuchsvorbereitung.....	108
4.5	Versuchsaufbau.....	109
4.5.1	Einbringung der Trag- und Bettungsschicht.....	109
4.5.2	Pflasterung der Flächen.....	110
4.5.3	Installation der Oberflächenabflussmessung.....	111
4.6	Felduntersuchung.....	111
4.6.1	Tragfähigkeit der Tragschicht.....	111
4.6.2	Infiltrationsrate des gesamten Straßenaufbaus.....	113
4.6.3	Wassergehalt der Fuge.....	115
4.6.4	Temperatur der Fuge.....	115
4.7	Messung der klimatischen Kenngrößen.....	115
4.7.1	Niederschlagsrate.....	115
4.7.2	Lufttemperatur.....	116
4.7.3	Relative Luftfeuchtigkeit.....	116
4.7.4	Windgeschwindigkeit.....	117
4.7.5	Aktuelle Verdunstung.....	117
4.7.6	Grasreferenzverdunstung.....	118
4.8	Durchführung der Geländeversuche.....	120
4.9	Erfassung des Versickerungsprozesses.....	121
4.10	Simulation einer Hochwassersituation.....	126
4.11	Simulation von „clogging“-Effekten.....	128
4.12	Messung des Rutschwiderstandes.....	129

4.13	Messung der Infrarotstrahlung der Pflasterfläche	130
4.14	Versuchsrückbau	133
5	Bewertung der Geländeversuche.....	134
6	Wasserhaushaltsbilanzierung	139
6.1	Berechnung der Wasserbilanz	139
6.2	Modellrechnung	140
7	Ökonomische Betrachtung.....	143
7.1	Grundlagenermittlung	143
7.2	Vorplanung / Entwurfsplanung / Ausführungsplanung.....	143
7.3	Massenermittlung.....	143
7.4	Kostenermittlung baulicher Teile	143
7.5	Planung der Wartungs- und Unterhaltungsmaßnahmen.....	143
7.6	Kostenermittlung betrieblicher Teile	144
7.7	Zusammenfassung der ökonomischen Daten	144
8	Fazit	145
9	Literaturverzeichnis.....	148
9.1	Literatur	148
9.2	Normen.....	153
10	Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens	155
10.1	Teilnahme der Projektteilnehmer an Tagungen.....	155
10.2	Vorträge.....	156
10.3	Abstracts.....	157
10.4	Veröffentlichungen	157
10.5	Messebeteiligungen	158
10.6	Besucher auf der Versuchsfläche	158
10.7	Weitere Pressearbeit	158

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Wasserdurchlässig gestalteter Flächenbelag. Links: Blockdiagramm des Straßenaufbaus; Rechts: Foto des geoSTON [®] protect in anthrazit der Firma Heinrich Klostermann GmbH & Co. KG Betonwerke, Coesfeld.....	26
Abbildung 2: Versuchsanordnung zur Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts mit stationärer hydraulischer Druckhöhe [Wesc08].	39
Abbildung 3: Proctortopf P150 zur Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von Proben mit Größtkorn $d < 31,5$ mm [Wesc08].	40
Abbildung 4: Versuchsanordnung zur Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von Proben mit Größtkorn $d < 20$ mm im Proctortopf P100 (Pfeile zeigen in Fließrichtung) [Wesc08].	40
Abbildung 5: Wasseraufnahme- und Wasserhaltevermögen (Gew.-%) sowie Wasserdurchlässigkeitsbeiwert (m/s) der untersuchten Materialien.....	43
Abbildung 6: Versuchsanordnung zur Messung des kapillaren Wasseraufstiegs [Wesc08].	45
Abbildung 7: Saugspannungsdiagramm mit pF-Kurven für die Böden Sand, Schluff und Ton [SS02].	47
Abbildung 8: Skizze eines pF-Topfes (links) und geöffneter pF-Topf mit eingesetzter Keramik-Platte und Proben (rechts) [R11].	47
Abbildung 9: Saugspannungsdiagramm für die Fugenmaterialien Basaltsplitt 1/3 und Füll-sand 0/2 [R11].	49
Abbildung 10: Ergebnisse der Messung der thermischen Eigenschaften an vier Mineralstoffen für drei Feuchteszenarien (Wärmeleitfähigkeit λ (W/(m·K), volumenbezogene Wärmekapazität c_p (10^6 J/(m ³ ·K) und Temperaturleitfähigkeit a (10^{-6} m ² /s) im trockenen Zustand (S1), im feuchten Zustand nach Zugabe von 20 ml Wasser (S2) und im vollgesättigten Zustand (S3)).	52
Abbildung 11: Haufwerksporige Betonpflastersteine mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen. Links: Prototyp K (Hartkalkstein); Mitte: Prototyp S (Glas); rechts: Prototyp W (Blähschiefer) [R11].	57
Abbildung 12: Haufwerksporige Betonpflastersteine mit unterschiedlich starker Vorsatzschicht. Links oben: Prototyp O (einschichtig); rechts oben: Prototyp Z (1 cm mächtige Vorsatzschicht); links unten: Prototyp T (2 cm mächtige Vorsatzschicht); rechts unten: Prototyp U (4 cm mächtige Vorsatzschicht) [R11].	57
Abbildung 13: Eingefärbte haufwerkporige Betonpflastersteine; links: Prototyp G (anthrazit 2 %); rechts: Prototyp I (anthrazit 7 %) [R11].	58
Abbildung 14: Gefügedichte Betonpflastersteine. Links: anthrazitfarbener, gefügedichter Betonpflasterstein (Prototyp Gefda); rechts: grauer, gefügedichter Betonpflasterstein (Prototyp Gefdg) [R11].	58

Abbildung 15: Schematischer Versuchsaufbau zur Ermittlung des Verdrängungsvolumens [R11].	62
Abbildung 16: Vergleich der Werte für den Porenanteil n und die Porenzahl e [R11].	62
Abbildung 17: Abhängigkeit der im Labor ermittelten Verdunstungsraten ET_{lab} vom Porenvolumen V_{Poren} .	63
Abbildung 18: Graustufen-Bilder der microCT-Messungen.	64
Abbildung 19: 3D-Modelle der Vorsatzschicht und des Kernbetons mit dazugehörigem Porenvolumen.	65
Abbildung 20: Schliffaufnahme der Vorsatzschicht von geoSTON® protect grau (Geog) (links) und des Kernbetons (rechts) unter dem Digitalmikroskop	66
Abbildung 21: Vergleich des Schliffes aus dem Kernbeton (links) mit dem dazugehörigen microCT-Bild (rechts).	67
Abbildung 22: Versuchsaufbau für die Messung der maximalen Rauigkeit [R11].	68
Abbildung 23: Abhängigkeit der maximalen Rauigkeit R_{max} von der maximalen Korngröße [R11].	68
Abbildung 24: Abhängigkeit der Labor-Verdunstungsraten ET_{lab} von der maximalen Rauigkeit R_{max} .	69
Abbildung 25: Benetzbarkeit eines Flüssigkeitstropfens auf einer festen Oberfläche. Durch Anlegen einer Tangente im Dreiphasenpunkt an den Tropfen kann der Benetzungswinkel α bestimmt werden, nach [D02].	69
Abbildung 26: Zusammenhang zwischen der Benetzungsklasse und der maximalen Rauigkeit R_{max} [R11].	71
Abbildung 27: Abhängigkeit der Labor-Verdunstung ET_{lab} von den verschiedenen Benetzungsklassen [R11].	72
Abbildung 28: Foto der Triaxialzelle [R11].	72
Abbildung 29: Schneckenförmige Rillen im Fußstück der Triaxialzelle [R11].	73
Abbildung 30: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130 [R11].	74
Abbildung 31: Schematischer Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130 [R11].	74
Abbildung 32: Ergebnisse der Messung der Wasserdurchlässigkeit [R11].	77
Abbildung 33: Ergebnisse der Messung des Wasseraufnahmevermögens durch Wägung [R11].	78
Abbildung 34: Ergebnisse der Messung des Wasserhaltevermögens [R11].	79
Abbildung 35: Saugspannungs-Diagramm für den geoSTON® protect grau (Geog) und anthrazit (Geoa) und die Prototypen A und B für die pF-Stufen 1,8 (15.09.10 bis 01.10.10), 2,5 (07.12.10 bis 07.04.11), 3 (01.12.10 bis 07.04.11) und 4,2 (22.12.10 bis 02.03.11) [R11].	82

Abbildung 36: Ergebnisse der Messung der thermischen Eigenschaften an Pflasterstein-Prototypen für drei Feuchteszenarien (Wärmeleitfähigkeit λ (W/(m·K), volumenbezogene Wärmekapazität c_p (10^6 J/(m ³ ·K) und Temperaturleitfähigkeit a (10^{-6} m ² /s) im trockenen Zustand (S1), im feuchten Zustand nach Zugabe von 20 ml Wasser (S2) und im vollgesättigten Zustand (S3)) [R11].	84
Abbildung 37: Schematische Darstellung des Laborverdunstungsversuches (LEMD). Alle Abmessungen sind in m angegeben; Die bewässerte Probe (1) befindet sich in der Verdunstungszelle (4) auf der Waage (2) und wird von der Rotlichtlampe (3) erwärmt. Der Wasserdampf wird über den Luftstrom abgeführt (erzeugt von einem Ventilator (5) und überprüft mit einem Hitzedraht-Anemometer (7)). Der Masseverlust wird von der Waage gemessen und über den Computer (9) gespeichert. Zusätzlich wird ein Wasserdampfgradient vom Lufteinlass (Sensor 6a) und dem Luftauslass (Sensor 6b) gemessen und mit einem Datenlogger (8) gespeichert [SC11].	86
Abbildung 38: Ergebnisse der Laborverdunstungsmessung der entwickelten Prototypen	88
Abbildung 39: Korrelationsmatrix [R11]. Durch die Farbgebung wird die Güte der Korrelation dargestellt (relativ gute Korrelation = grüne Flächen; mögliche Korrelation = gelbe Flächen; keine Korrelation = rote Flächen).	90
Abbildung 40: Gemessene Ist-Werte x_i und deren dazugehörigen z.B. auf einer Geraden liegenden Modell-Werte x_m .	94
Abbildung 41: Abhängigkeit der Labor-Verdunstung ET_{lab} von der Benetzungsklasse der Pflastersteine [R11].	96
Abbildung 42: Abhängigkeit der Labor-Verdunstung ET_{lab} von der maximalen Rauigkeit R_{max} [R11].	97
Abbildung 43: Abhängigkeit der Labor-Verdunstung ET_{lab} von der Schichtigkeit der Pflastersteine [R11].	97
Abbildung 44: Abhängigkeit der Labor-Verdunstung ET_{lab} von der Farbe der Pflastersteine [R11].	98
Abbildung 45: Abhängigkeit der Labor-Verdunstung ET_{lab} von der Gruppenzugehörigkeit der Pflastersteine [R11].	99
Abbildung 46: Graphische Darstellung der funktionalen Beziehungen zwischen Haupt- und Nebenhypothesen [R11].	99
Abbildung 47: Geographische Lage der Untersuchungsfläche [S08].	102
Abbildung 48: Vorerkundungen der Untersuchungsfläche in Coesfeld (links: Ansicht der Grube; rechts: Profilansicht der Grubenwand).	104
Abbildung 49: Lage der Rammkernsondierungen und Infiltrationsversuche auf der Untersuchungsfläche.	104
Abbildung 50: Bohrkerns aus der Rammkernsondierung.	105

- Abbildung 51: Infiltrationsversuch mittels Doppelringinfiltrrometer (links: Doppelringinfiltrrometer-Versuch mit instationärem Druckgefälle; rechts: zeitliche Abnahme der flächenbezogenen Infiltrationsraten der drei Infiltrationsversuche). 106
- Abbildung 52: Konstruktive Versuchsvorbereitungen (links: Pumpenschacht mit einem Filter aus gut durchlässigem haufwerksporigen Beton am tiefsten Punkt der Drainageschicht, rechts: Trennung der Messfelder mittels PVC-Platten). 108
- Abbildung 53: Schrägaufsicht auf die Untersuchungsfläche mit der Messfeldbelegung I (Geländeversuch I) zur Veranschaulichung des Fugenbildes..... 109
- Abbildung 54: Schematischer Grundriss des Versuchsaufbaus auf der Untersuchungsfläche mit Füllung der Messfelder entsprechend der Messfeldbelegung I (Geländeversuch I); blaue Linie kennzeichnet die Schnittlage für Abbildung 55..... 110
- Abbildung 55: Schematische Profilsansicht des Versuchsaufbaus auf der Untersuchungsfläche mit Füllung der Messfelder entsprechend der Messfeldbelegung I (Geländeversuch I). 111
- Abbildung 56: Durchführung des statischen Lastplattendruckversuches (links) und des dynamischen Lastplattendruckversuchs (rechts) zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Tragschicht an Messfeld 7. 112
- Abbildung 57: Ergebnisse der Verformungsmodule E_{V2} der Lastplattendruckversuche (MN/m^2) zur Ermittlung der Tragfähigkeit..... 112
- Abbildung 58: Tropfenringinfiltrrometer-Versuch (links: Übersicht über den Versuchsaufbau mit Beregnungsanlage, Rechts: Detailansicht des abgedichteten Stahlringes mit kapazitivem Sensor; unten: EDV-Auswertung mit Beispiel für Flächen mit hoher flächenbezogener Infiltrationsrate). 114
- Abbildung 59: Darstellung der Rotation des „Tunnel“-Verdunstungsmessers (TUV) um die Referenzfläche. 118
- Abbildung 60: Exemplarische Messung der aktuellen Verdunstungsrate ET_a (mm/h) und der Niederschlagsrate P (mm/h) für die innen liegende Referenzfläche 1 (grüne Linie) und dem Messfeld 3 aus Geländeversuch I mit geoSTON® protect anthrazit (rote Linie) [SGC11]. 118
- Abbildung 61: Verlauf der Färbung in unterschiedlichen Tiefen auf dem Messfeld 2 mit wasserdurchlässigen Pflastersteinen im Geländeversuch I (a: Geländeoberkante; b: Bettungsschicht in 8 cm Tiefe; c: Bettungsschicht in 10 cm Tiefe; d: Tragschicht in 18 cm Tiefe; e: Tragschicht in 24 cm Tiefe; f: Profilsansicht) [B10]. 122
- Abbildung 62: Schematische Profildarstellung des Farbverlaufes unter wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen [B10]...... 123
- Abbildung 63: Verlauf der Färbung in unterschiedlichen Tiefen auf dem Messfeld 6 mit gefügedichten Pflastersteinen im Geländeversuch I (a: Geländeoberkante;

b: Bettungsschicht in 8 cm Tiefe; c: Bettungsschicht in 10 cm Tiefe; d: Tragschicht in 15 cm Tiefe; e: Tragschicht in 22 cm Tiefe; f: Tragschicht in 30 cm Tiefe) [B10].	124
Abbildung 64: Verlauf der Färbung im Laborversuch unter gefügedichten Pflastersteinen direkt unterhalb der Pflastersteine [B10].	124
Abbildung 65: Schematische Profildarstellung des Farbverlaufes unter wasserundurchlässigen gefügedichten Flächenbefestigungen [B10].	125
Abbildung 66: Aufsicht auf Messfeld 1 während der Beregnung über eine Schlauchdüse [H10].	126
Abbildung 67: Tropfenringinfiltrometer-Versuch für den Nachweis von „clogging“-Effekten (links: Aufsicht einer künstlich zugesetzten Fläche; Rechts: EDV-Auswertung mit Beispiel für Flächen mit niedriger Infiltrationsrate.	128
Abbildung 68: Übersicht über die Infrarotmessungen des Geländeversuches II am 30.09.2011.	131
Abbildung 69: Infrarotmessungen benachbarter Messfelder des Geländeversuches II am 30.09.2011.	131
Abbildung 70: Exemplarische Korrelation der Verdunstungswerte zwischen den Messfeldern mit den Belägen geoSTON® protect grau (innenliegende Referenzfläche mit Geog) und geoSTON® protect anthrazit (Messfläche 3 mit Geoa). Angabe der Verdunstungsrate in mm/d.	134
Abbildung 71: Vergleich der gemessenen Eigenschaften zwischen feinkörnigen (rot gestrichelte Linien) und grobkörnigen (blau durchgezogene Linien) Lockermaterialien (oben) und Pflasterstein-Prototypen (unten) [SGC10b].	138
Abbildung 72: Darstellung der Verdunstungsrate in Abhängigkeit vom Versiegelungsgrad für vier Szenarien auf Lößböden (nutzbare Feldkapazität 22 %) mit hohen Flurabstände (größer 3 m).	140
Abbildung 73: Kartendarstellung der Versiegelungsgrade im Stadtgebiet Münster.	141

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Mittlere Abflussbeiwerte (aus [DWA07]) sowie Verdunstung, Versickerung und Abfluss als Anteil am Niederschlag (aus [UBA09]).	27
Tabelle 2: Variationsmöglichkeiten der Eigenschaften der Mineralstoffe nach [FGSV04a] und [FGSV04b].	28
Tabelle 3: Kennzeichen der Tragschichtmaterialien (n.b.: nicht bestimmt).	30
Tabelle 4: Kennzeichen der Bettungsmaterialien (n.b.: nicht bestimmt).	31
Tabelle 5: Kennzeichen der Fugenmaterialien.	31

Tabelle 6: Ermittlung der Kornformkennzahl: Verwendete Kornklassen und Stabsiebe.	33
Tabelle 7: Nachweis der Filterstabilität zwischen Tragschichtmaterial und Bettungsschichtmaterial; nach [K08].	36
Tabelle 8: Nachweis der Filterstabilität zwischen Bettungsschichtmaterial und Fugenmaterial; nach [K08].	37
Tabelle 9: Auflistung der verschiedenen Messreihen für die Lockermaterialien.	49
Tabelle 10: Eigenschaften der 25 Prototypen, dem geoSTON® protect in den Farben grau (Geog) und anthrazit (Geoa) und einem gefügedichten Pflasterstein, ebenfalls in den Farben grau (Gefdg) und anthrazit (Gefda).....	55
Tabelle 11: Tabellarische Darstellung der Ergebnisse der Untersuchung der Durchgängigkeit an vier ausgewählten Kernen.....	65
Tabelle 12: Einteilung der Prototypen in die verschiedenen Benetzungsklassen [R11].	70
Tabelle 13: Auflistung der verschiedenen Messreihen der Sauspannung an den Prototypen.....	81
Tabelle 14: Einteilung der Irrtumswahrscheinlichkeiten [Bü08].	95
Tabelle 15: Ergebnisse der flächenbezogenen Infiltrationsraten der Doppelringinfiltrometer-Versuche (in mm/s und l/(s·ha)).	106
Tabelle 16: Übersicht über den zeitlichen Verlauf der Geländeversuche I und II (ⓐ-ⓑ chronologisch sortierte Messperioden über ein Jahr).	120
Tabelle 17: Zusammenfassung der Infiltrationsraten (l/(s·ha) der sieben Messfelder nach x Minuten Messung (Minuten) mittels Tropfenringinfiltrometer (nach Erstellung, nach x Jahren Alter (Monate) und nach Zusetzen der Poren und Fugen mittels Milisil-Zugabe (l)). n.b.: nicht bestimmt.	129
Tabelle 18: Ergebnisse der Infrarotmessung des Geländeversuches II. Die angebenen Temperaturen entstammen der Messung im Großmaßstab vom 30.09.2011.	132
Tabelle 19: Ergebnisse der Infrarotmessung des Geländeversuches II im Großmaßstab vom 30.09.2011. Für jedes Bild gilt die eigene Skalierung der Oberflächentemperaturen.....	133
Tabelle 20: Vergleichende Bewertung der Verdunstungsmessung für Geländeversuch I und Geländeversuch II. Die entsprechenden Messperioden sind Tabelle 16 zu entnehmen.	135
Tabelle 21: Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Verdunstungsmessung im Geländeversuch für ausgewählte Flächenbeläge.	137
Tabelle 22: Ergebnisse der flächendifferenzierten Berechnung der Verdunstung für das Stadtgebiet von Münster.	142

Verzeichnis der Anhänge

1. Lockermaterialien	A1
1.1. Datenblätter	A1
1.1.1. Tragschicht	A1
1.1.1.a. HKS 0/32	A1
1.1.1.b. Tragschicht NL	A3
1.1.1.c. Dränsand NL	A5
1.1.1.d. Feld 4 unterer Bereich TL – SoB	A7
1.1.1.e. Feld 5 oberer Bereich TL – SoB	A9
1.1.1.e.1. Erster Durchgang	A9
1.1.1.e.2. Zweiter Durchgang	A11
1.1.1.f. RC 0/45	A13
1.1.1.g. HKS 0/45	A15
1.1.1.h. 0/32 rot/grün	A17
1.1.1.i. 0/32 grün oben	A19
1.1.1.j. 0/32 rot unten	A21
1.1.2. Bettungsschicht	A23
1.1.2.a. HKS 2/5 A	A23
1.1.2.b. HKS 2/5 B	A25
1.1.2.c. Pflastermörtel	A27
1.1.2.d. Glasasche	A29
1.1.2.e. Glasasche-Sand-Gemisch	A32
1.1.3. Fugenmaterial	A35
1.1.3.a. Basaltsplit 1/3	A35
1.1.3.b. Extensivsubstrat 70/30	A37
1.1.3.c. Extensivsubstrat	A39
1.1.3.d. Gewaschener Sand	A40
1.1.3.e. Füllsand	A43
1.2. Kornverteilungen	A45
1.2.1. HKS 0/32	A45
1.2.2. Tragschicht NL	A46
1.2.3. Dränsand NL	A47
1.2.4. Feld 4 unterer Bereich TL-SoB	A48
1.2.5. Feld 5 oberer Bereich TL-SoB	A49
1.2.6. RC 0/45	A50
1.2.7. HKS 0/45	A51
1.2.8. 0/32 rot/grün	A52
1.2.9. 0/32 grün oben	A53
1.2.10. 0/32 rot unten	A54
1.2.11. HKS 2/5 A	A55
1.2.12. HKS 2/5 B	A56
1.2.13. Pflastermörtel	A57
1.2.14. Glasasche	A58
1.2.15. Glasasche-Sand-Gemisch	A59
1.2.16. Basaltsplit 1/3	A60
1.2.17. Extensivsubstrat	A61
1.2.18. Gewaschener Sand	A62
1.2.19. Füllsand	A63
1.3. Plattigkeitskennzahl	A64
1.3.1. HKS 0/32	A64
1.3.2. Tragschicht NL	A65
1.3.3. Feld 4 unterer Bereich TL-SoB	A66
1.3.4. Feld 5 oberer Bereich-SoB	A67
1.3.5. RC 0/45	A68
1.3.6. HKS 0/45	A69
1.3.7. 0/32 Rot-Grün	A70
1.3.8. 0/32 grün oben	A71
1.3.9. 0/32 rot unten	A72

1.4. Kornformkennzahl	A73
1.4.1.HKS 0/32	A73
1.4.2.Tragschicht NL	A74
1.4.3.Feld 4 unterer Bereich TL-SoB	A75
1.4.4.RC 0/45	A76
1.4.5.HKS 0/45	A77
1.4.6.0/32 rot/grün	A78
1.4.7.0/32 grün oben	A79
1.4.8.0/32 rot unten	A80
1.5. Anteil gebrochener Körner	A81
1.5.1.HKS 0/32	A81
1.5.2.Tragschicht NL	A82
1.5.3.Feld 4 unterer Bereich TL-SoB	A83
1.5.4.Feld 5 oberer Bereich TL-SoB	A84
1.5.5.RC 0/45	A85
1.5.6.HKS 0/45	A86
1.5.7.0/32 rot/grün	A87
1.5.8.0/32 grün oben	A88
1.5.9.0/32 rot unten	A89
1.6. Korndichte	A90
1.6.1.Tragschicht NL	A90
1.6.2.Dränsand NL	A91
1.6.3.Feld 4 unterer Bereich TL-SoB	A92
1.6.4.Feld 5 oberer Bereich TL-SoB	A93
1.6.5.0/32 rot/grün	A94
1.6.6.0/32 grün oben	A95
1.6.7.0/32 rot unten	A96
1.6.8.HKS 2/5 A	A97
1.6.9.HKS 2/5 B	A98
1.6.10. Pflastermörtel	A99
1.6.11. Glasasche	A100
1.6.12. Glasasche-Sand-Gemisch	A101
1.6.13. Basaltsplit 1/3	A102
1.6.14. Extensivsubstrat	A103
1.6.15. Gewaschener Sand	A104
1.6.16. Füllsand	A105
1.6.16.a. Füllsand (lufttrocken)	A105
1.6.16.b. Füllsand (ofentrocken)	A106
1.7. Proctordichte	A107
1.7.1.HKS 0/32	A107
1.7.2.Tragschicht NL	A109
1.7.3.Dränsand NL	A110
1.7.4.Feld 5 oberer Bereich TL-SoB	A112
1.7.5.RC 0/45	A113
1.7.6.HKS 0/45	A115
1.7.6.a. Siebung	A115
1.7.6.b. Tragschicht	A116
1.7.7.0/32 rot/grün	A120
1.7.8.0/32 grün oben	A122
1.7.9.0/32 rot unten	A124
1.7.10. HKS 2/5 A	A126
1.7.11. HKS 2/5 B	A128
1.7.12. Pflastermörtel	A130
1.7.13. Glasasche	A132
1.7.14. Glasasche-Sand-Gemisch	A134
1.7.15. Basaltsplit 1/3	A136
1.7.16. Extensivsubstrat	A138
1.7.17. Gewaschener Sand	A140

1.7.18. Füllsand	A143
1.8. Durchlässigkeit	A146
1.8.1.HKS 0/32	A146
1.8.2.Tragschicht NL	A148
1.8.3.Dränsand NL	A150
1.8.4.Feld 4 unterer Bereich TL-SoB	A152
1.8.5.Feld 5 oberer Bereich TL-SoB	A154
1.8.6.RC 0/45	A156
1.8.7.HKS 0/45	A158
1.8.7.a. I	A158
1.8.7.b. I+II+III	A160
1.8.7.c. II	A162
1.8.7.d. III	A164
1.8.8.0/32 rot/grün	A166
1.8.9.0/32 grün oben	A168
1.8.10. 0/32 rot unten	A170
1.8.11. HKS 2/5 A	A172
1.8.12. HKS 2/5 B	A174
1.8.13. Pflastermörtel	A176
1.8.14. Glasasche	A178
1.8.15. Glasasche-Sand-Gemisch	A180
1.8.16. Basaltsplit 1/3	A182
1.8.17. Extensivsubstrat	A184
1.8.18. Gewaschener Sand	A186
1.8.19. Füllsand	A189
1.9. Wasseraufnahme- und haltevermögen	A191
1.9.1.HKS 0/32	A191
1.9.2.Tragschicht NL	A194
1.9.3.Dränsand NL	A193
1.9.4.Feld 4 unterer Bereich TL-SoB	A194
1.9.5.Feld 5 oberer Bereich TL-SoB	A195
1.9.6.RC 0/45	A196
1.9.7.HKS 0/45	A197
1.9.8.0/32 rot/grün	A198
1.9.9.0/32 grün oben	A199
1.9.10. 0/32 rot unten	A200
1.9.11. HKS 2/5 A	A201
1.9.12. HKS 2/5 B	A202
1.9.13. Pflastermörtel	A203
1.9.14. Glasasche	A204
1.9.15. Glasasche-Sand-Gemisch	A205
1.9.16. Basaltsplit 1/3	A206
1.9.17. Extensivsubstrat	A207
1.9.18. Gewaschener Sand	A208
1.9.19. Füllsand	A209
1.10. Kapillare Steighöhe	A210
1.11. Frost-Tau-Wechsel	A212
1.11.1. HKS 0/32	A212
1.11.2. Feld 4 unterer Bereich TL-SoB	A213
1.11.3. Feld 5 oberer Bereich TL-SoB	A214
1.11.4. RC 0/45	A215
1.11.5. HKS 0/45	A216
1.12. Saugspannung	A217
1.12.1. Fuge pF1,8 ab 15.09.10	A218
1.12.2. Fuge pF2.5 ab 24.08.10	A219
1.12.3. Fuge pF2,5 ab 07.10.10	A220
1.12.4. Fuge pF 2.5 ab 07.12.10	A221

1.12.5. Fuge pF3 ab 08.06.10	A222
2. Pflastersteine	A223
2.0. Bilder Prototypen	A223
2.0.1.Prototyp A und B	A223
2.0.2.Prototyp C und D	A224
2.0.3.Prototyp E und Ff	A225
2.0.4.Prototyp Fr und G	A226
2.0.5.Prototyp Gefda und Gefdg	A227
2.0.6.Prototyp Geoa und Geog	A228
2.0.7.Prototyp H und I	A229
2.0.8.Prototyp J und K	A230
2.0.9.Prototyp M und N	A231
2.0.10. Prototyp O und R	A232
2.0.11. Prototyp S und T	A233
2.0.12. Prototyp Tm und U	A234
2.0.13. Prototyp V und W	A235
2.0.14. Prototyp X und Y	A236
2.0.15. Prototyp Z und Aa	A237
2.1. Abmessungen Prototypen	A238
2.2. Festigkeiten	A242
2.3. Porenanteil, Porenzahl, Korndichte, Trockendichte	A249
2.3.1.Porenanteil Prototyp A bis O	A249
2.3.2.Porenanteil Prototyp R bis Geog	A250
2.3.3.Porenanteil Prototyp Geoa	A251
2.3.4.Porenzahl Prototyp A bis O	A252
2.3.5.Porenzahl Prototyp R bis Geog	A253
2.3.6.Porenzahl Prototyp Geoa	A254
2.4. CT-Schliff-Untersuchungen	A255
2.5. Maximale Rauigkeit	A264
2.6. Wasserdurchlässigkeiten	A265
2.6.1.Prototyp A bis G	A265
2.6.2.Prototyp H bis X	A266
2.6.3.Prototyp Y bis Geoa	A267
2.7. Wasseraufnahmevermögen	A268
2.7.1.Prototyp A bis H	A268
2.7.2.Prototyp I bis Y	A269
2.7.3.Prototyp Z bis Geoa	A270
2.8. Wasserhaltevermögen	A271
2.8.1.Prototyp A bis H	A271
2.8.2.Prototyp I bis Y	A272
2.8.3.Prototyp Gefdg bis Geoa	A273
2.8.4.Prototyp Z bis Geoa	A274
2.9. Saugspannung	A275
2.9.1.pF 1,8 15.09.10 – 01.10.10	A275
2.9.2.pF 2,5 24.08.10 – 10.09.10	A276
2.9.3.pF 2,5 07.10.10 – 05.11.10	A277
2.9.4.pF 2,5 07.12.10 – 07.04.11	A278
2.9.5.pF 3 08.06.10 – 24.06.10	A279
2.9.6.pF 3 01.12.10 – 07.04.11	A280
2.9.7.pF 4,2 22.12.10 – 02.03.11	A281
2.10. Thermische Eigenschaften	A282

2.10.1. Wärmeleitfähigkeit	A282
2.10.2. Voluembbezogene Wärmekapazität	A283
2.10.3. Temperaturleitfähigkeit	A284
2.11. Verdunstung	A285
2.11.1. A4 – J5	A285
2.11.2. K4 – Gefda3	A286
2.11.3. Geog – Geoa	A287
3. Vorerkundung	A388
3.1. Rammkernsondierungen	A288
3.1.1.RKS 1	A288
3.1.2.RKS 3	A289
3.1.3.RKS 3	A290
3.1.4.RKS 4	A291
4. Feldversuche	A292
4.1. Lastplattendruckversuche	A292
4.1.1.Sieblinien LPDV	
4.2. Infiltrometerversuche	A298
4.2.1.Datenblatt Feld 1	A298
4.2.2.Datenblatt Feld 2	A299
4.2.3.Datenblatt Feld 3	A300
4.2.4.Datenblatt Feld 4	A301
4.2.5.Datenblatt Feld 5	A302
4.2.6.Datenblatt Feld 6	A303
4.2.7.Datenblatt Feld 7	A304
5. Ökonomie	A305
5.1. Wirtschaftlichkeitsberechnung	A305

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
CEM	Portlandkompositzement
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DRI	Doppelringinfiltrrometer
EN	Europäische Normen
HKB	Heinrich Klostermann GmbH & Co. KG Betonwerke
HKS	Hartkalkstein
LEMD	Laborverdunstungsmessanlage („Laboratory evaporation measurement device“)
NL	Niederlande
RC	Recycling-Material
TL	Technische Lieferbedingungen
TOC	Gesamter organischer Gehalt (Total organic compound)
TUV	„Tunnel“-Verdunstungsmesser
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen

Verzeichnis der verwendeten Größen und Einheiten

Größe	Einheit	Beschreibung
A	cm ²	Querschnittsfläche
A_{Probe}	m ²	Probenoberfläche
a	m ² /s	Temperaturleitfähigkeit
C_c	1	Krümmungszahl
C_c	1	Anteil der gebrochenen Körner
C_r	1	Anteil der gerundeten Körner
C_{tc}	1	Anteil der vollständig gebrochenen Körner
C_{tr}	1	Anteil der vollständig gerundeten Körner
$c\rho$	J/(m ³ ·K)	volumenbezogene Wärmekapazität
D_{15}	mm	Korndurchmesser des gröberen Lockermaterials, der bei 15 M.-% Siebdurchgang der Körnungslinie vorliegt
D_{50}	mm	Korndurchmesser des gröberen Lockermaterials, der bei 50 M.-% Siebdurchgang der Körnungslinie vorliegt
d	m	Durchmesser / Korndurchmesser
d_{50}	mm	Korndurchmesser des feineren Lockermaterials, der bei 50 M.-% Siebdurchgang der Körnungslinie vorliegt
d_{85}	mm	Korndurchmesser des feineren Lockermaterials, der bei 85 M.-% Siebdurchgang der Körnungslinie vorliegt
d_i	mm	Korndurchmesser der Kornklasse i
ET_a	mm/h	Verdunstungsrate im Geländeversuch gemessen mit TUV
ET_{Lab}	mm/h	Verdunstungsrate im Labor
ET_o	mm/h	Grasreferenzverdunstungsrate
e	1	Porenzahl
$e_s(T)$	hPa	Sättigungsdampfdruck als Tagesmittel; der Sättigungsdampfdruck wird aus der Lufttemperatur als Tagesmittel nach der Formel $e_s(T) = 6,11 \cdot e^{\left(\frac{17,62 \cdot T}{243,12 + T}\right)}$ ermittelt
FI	1	Gesamt-Plattigkeitskennzahl
FI_i	1	Plattigkeitskennzahl der Kornklasse i
h	m	Hydraulische Druckhöhe
h_k	m	kapillare Steighöhe
k_f	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert
l	m	Fließlänge
L	mm	Umrechnungsfaktor der Nettostrahlung der Verdunstung in mm Verdunstungshöhe ((W·h)/(m ² ·mm)); hier gilt $L = 681 \text{ (W·h)/(m}^2\text{·mm)}$
\dot{m}_{LabET}	g/7,5 h	Massenfluss durch Verdunstung im Labor
m_A	g	Abtropfgewicht

Größe	Einheit	Beschreibung
m_c	g	Masse der gebrochenen Körner
m_d	g	Trockenmasse
m_i	g	Masse der Kornklasse i / Messprobe i
m_{inkK}	g	Masse der nicht-kubischen Körner der Kornklasse i
m_{tSS}	g	Masse der Kornklasse i, die durch die Stabsiebe hindurch gehen
m_R	g	Masse des Siebrückstandes
m_r	g	Masse der gerundeten Körner
m_{tc}	g	Masse der vollständig gebrochenen Körner
m_{tr}	g	Masse der vollständig gerundeten Körner
$m_{\text{w,sat}}$	g	Masse der wassergesättigten Probe
$m_{\text{w,teilsat}}$	g	Masse der wasserteilgesättigten Probe
n	1	Porenanteil
P	mm/h	Niederschlagsrate
p	1	Irrtumswahrscheinlichkeit
R^2	1	Bestimmtheitsmaß
R_{max}	m	maximale Rauigkeit
Rn	W/m ²	Strahlungsbilanz / Nettostrahlung als Tagesmittel
r	1	Korrelationskoeffizient
$r_{10(0,2)}$		Regenspende für einen 10 Minuten-Regen und einer Überschreitung von einmal in 5 Jahren
Sl	1	Gesamt-Kornformkennzahl
Sl_i	1	Kornformkennzahl der Kornklasse i
s	hPa/K	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve; die Steigung des Sättigungsdampfdruck als Tagesmittel wird nach der Formel $s = e_s(T) \cdot \frac{4284}{(43,12 + T)^2}$ ermittelt
T	°C	Temperatur / Lufttemperatur als Tagesmittel
TSS		Gesamt-Quadratsumme
Δt	s	Zeitdauer
U	1	Ungleichförmigkeitszahl
U	%	relative Luftfeuchtigkeit als Tagesmittel; die relative Luftfeuchtigkeit wurde mittels der Luftfeuchtemesser im TUV gemessen
u_{air}	m/s	Luftgeschwindigkeit
\dot{V}	l/(s·ha)	Infiltrationsrate
Var_{ges}	1	Varianz-Gesamt
Var_{Modell}	1	Varianz des Modells
V_{Fe}	cm ³	Volumen der porenfreien Festmasse

Größe	Einheit	Beschreibung
V_K	cm ³	Volumen im Kapillaryknometer
V_{Poren}	cm ³	Volumen der Poren
V_{Probe}	cm ³	Volumen der Probe
V_{Verd}	cm ³	Verdrängungsvolumen
v_2	m/s	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe als Tagesmittel; die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe wurde mittels der Windgeschwindigkeit im TUV v_{TUV} nach der Formel $v_2 = v_{\text{TUV}} \cdot \left(\frac{2}{0,13}\right)^{0,15}$ ermittelt
v_{TUV}	m/s	Windgeschwindigkeit im „Tunnel“-Verdunstungsmesser
w_{Pr}	1	optimaler Wassergehalt
w_{WAV}	1	Wasseraufnahmevermögen
w_{WHV}	1	Wasserhaltevermögen
x_i		gemessener Ist-Wert
x_m		dazugehöriger Modell-Wert
α	°	Benetzungswinkel
λ	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
γ	hPa/K	Psychrometerkonstante
ρ_d	g/cm ³	Trockendichte
ρ_{Pr}	g/cm ³	Proctordichte
φ_{rel}	1	Relative Luftfeuchtigkeit
ρ_s	g/cm ³	Korndichte
ρ_W	g/cm ³	Dichte des Wassers
σ		Standardabweichung

1 Zusammenfassung

Im Rahmen einer zweiphasigen Labor- und Geländeuntersuchung wurden wasser-durchlässige Pflasterstein-Beläge hinsichtlich der Erhöhung der Evaporation im urbanen Raum untersucht. Dabei waren insbesondere folgende Aspekte im Rahmen der im Straßenbau geltenden Regelungen und Vorschriften Gegenstand der Untersuchungen: Aufbau und Zusammensetzung der Trag- und Bettungsschicht, Fugenweite und -füllung, Aufbau und Zusammensetzung des Pflastersteins. Flächenbefestigungen aus wasserdurchlässigen Pflasterstein-Belägen besitzen bei Starkregeneignissen ein gewisses Rückhaltevermögen für Regenwasser. Dies bewirkt bei großflächiger Verwendung in erster Linie eine Entschärfung der Hochwassersituation. Der anthropogen beeinflusste urbane Wasserkreislauf kann durch Erhöhung der Grundwasserneubildung wieder dem natürlichen Wasserkreislauf angenähert werden. Die tatsächliche Verdunstung wurde erstmalig im Gelände mit Hilfe des neu entwickelten „Tunnel“-Verdunstungsmessers (TUV) gemessen. Im Vergleich zu einem undurchlässigen gefügedichten Betonsteinpflaster zeigen die im Vorhaben optimierten Pflastersteinprototypen im Durchschnitt eine beinahe 2,5-fach höhere Verdunstungsrate (149 mm/a). Gegenüber einem gefügedichten Pflasterstein-Belag, der einen Verdunstungsanteil von 7 % am Jahresniederschlag aufweist, kann ein wasserdurchlässiger und verdunstungsoptimierter Pflasterstein-Belag 18 % des Niederschlages verdunsten. Ein Rasengitterstein verdunstet 65 % des Jahresniederschla-ges. Die Wasserhaushaltsbilanzierung einer Stadt ergab, dass gegenüber den repräsentativen Bebauungsgebieten ein Austausch der undurchlässigen und an die Kanalisation angeschlossene Straßenflächen sowie gefügedichten Betonverbundpflasterflächen gegen wasserdurchlässige und verdunstungsoptimierte Pflastersteinbeläge eine Erhöhung der urbanen Evapotranspirationsraten um bis zu 12 % und damit eine Reduzierung des Abwasservolumens einer Stadt mit 250.000 Einwohner um 5 % bedeuten kann. Durch die durch die Erhöhung der Verdunstung entstehende Verdunstungskälte verbessert sich das Stadtklima. Durch die Erhöhung der Verdunstungsrate kann ebenfalls dem großflächigen, meist unerwünschten Anstieg des Grundwasserspiegels infolge massiver Versickerungsaktivitäten entgegengewirkt werden. Die derzeit bundesweit verwendeten Abflussbeiwerte für ein wasserdurchlässiges Pflaster von 0,25 (d.h. 25 % des Jahresniederschla-ges fließt oberirdisch ab) und Rasengitterstein von 0,15 sind aufgrund der vorliegenden Ergebnisse zu hoch. Außerdem wird bisher die Verdunstungsrate von 30 % eines gefügedichten Pflasterstein-Belages bundesweit überschätzt; die vorliegenden Untersuchungen weisen hier nur 7 % nach. Demgegenüber werden die Verdunstungsraten eines wasser-durchlässigen Pflasters mit 8 % unterschätzt. Hier sollte zukünftig folgende Auf-teilung auf die Wasserbilanzglieder verwendet werden: 18 % Verdunstung, 70 – 82 % Versickerung (in Abhängigkeit zum Durchlässigkeitsbeiwert des natürlichen Untergrundes) und 0 – 12 % Abfluss. Die Wasserbilanzglieder eines Rasengittersteins teilen sich zu 65 % Verdunstung, 35 % Versickerung und 0 % Abfluss auf. Das Vorhaben wurde von Heinrich Klostermann GmbH & Co. KG Betonwerke (HKB), Coesfeld, in Kooperation mit der Abteilung Angewandte Geologie der Universität Münster durchgeführt und durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU, Az: 23277/01 + /02) gefördert.

2 Einleitung

Versiegelte bzw. teilversiegelte Flächen besitzen gegenüber natürlich unversiegelten Flächen einen größeren Oberflächenabfluss, eine geringere Verdunstung (Evaporation) und eine geringere Grundwasserneubildung. Der natürliche Wasserkreislauf wird verändert. Es stellt sich ein so genannter **urbaner Wasserkreislauf** ein. Eine Zunahme versiegelter Flächen bedingt daher eine Erhöhung des Oberflächenabflusses. Deshalb sind Hochwasser nach starken Regenfällen in der Regel keine Naturkatastrophen, sondern größtenteils „hausgemacht“ und deshalb ein alarmierendes Zeichen für einen erheblich gestörten natürlichen Wasserkreislauf. Es wird nach speziellen Maßnahmen eines vorsorgenden Hochwasserschutzes durch Schaffung von neuen künstlichen Retentionsräumen gesucht, die ihr Vorbild im natürlichen Wasserkreislauf haben.

Beobachtungen der letzten Jahre und die Untersuchungen der Meteorologen zeigen, dass das **Klima** sich in den letzten Jahren signifikant verändert hat. Die Durchschnittstemperatur in Deutschland ist angestiegen, die Winterniederschläge in Form von Regen statt Schnee [BK05] und die extremen Niederschlagsereignisse [HD98] haben zugenommen. Dadurch sind bereits seit Mitte der 70er Jahre immer häufiger starke **Hochwasser** aufgetreten [HD98]. Während eines Hochwasserereignisses beschreibt das Speicherglied (Rücklage abzüglich Verbrauch) im kurzfristigen Wasserkreislauf den Wasserrückhalt im betrachteten Gebiet für den betrachteten Zeitraum. Dann tritt die im langfristigen Wasserhaushalt wichtige Größe der Verdunstung zurück, während demgegenüber die kurzfristige Speicherleistung im Einzugsgebiet das Abflussgeschehen ganz wesentlich beeinflusst wird. Die Versiegelung der Landschaft setzt die Speicherwirkung des Bodens in diesen Bereichen außer Kraft und führt zu einer entsprechenden Beschleunigung des Abflusses. Der konventionelle Hochwasserschutz durch Schaffung von **Retentionsräumen** wie Regenrückhaltebecken, Poldergebieten, etc. bedeutet oftmals einen zusätzlichen Flächenverbrauch und ist vielfach sehr kostenintensiv. Die Flächen stehen oftmals gar nicht zur Verfügung. Der **ökologische Hochwasserschutz** in Form von dezentraler Versickerung, Dachflächenbegrünung oder Regenwassernutzung [GC07] zeigt aufgrund der geringen Akzeptanz in der Bevölkerung und nur kleinräumiger Anwendung bisher einen eher geringen Einfluss auf den Wasserkreislauf.

Ein wasserdurchlässig gestalteter Straßenaufbau ist ein ökologisches System. Der **wasserdurchlässige Pflasterstein** ist aufgrund seines porigen und mehrschichtigen Aufbaus in der Lage, Regenwasser zu versickern. Dadurch wird die Grundwasserneubildung erhöht und die Bodenfunktion aktiviert. Wasserdurchlässig gestaltete Flächenbefestigungen haben einen großen innerstädtischen Einsatzbereich für Straßen der Bauklassen V und VI, Zufahrtsstrasse, PKW-Parkplätze sowie Rad- und Gehwege [BLfW05].

Bei der Produktreihe **geoSTON[®] protect** der HKB handelt es sich um ein sickerfähiges Pflastersystem aus haufwerksporigem Beton mit zweischichtigem Aufbau. Auf dem ca. 7,5 cm dicken, relativ grobkörnigen Hauptgesteinskörper befindet sich eine ca. 0,5 cm starke feinkörnige Vorsatzschicht, die als Filterschicht für Schadstoffe dient (Abbildung 1). Der **geoSTON[®] protect** besitzt als einziger wasserdurchlässiger

Pflasterstein in Deutschland eine „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung“ durch das Deutsche Institut für Bautechnik (Nr. Z-84.1-2 vom 29. Juni 2011). Die Zulassung beinhaltet, dass die wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen, auf denen der geoSTON[®] protect zum Einsatz kommt, zur Behandlung und Versickerung mineralölhaltiger Niederschlagsabflüsse von Verkehrsflächen dienen und dauerhaft flächenbezogene Niederschlagsabflussraten von bis zu 270 l/(s·ha) versickern können. Außerdem ist durch die feinkörnige Vorsatzschicht der Rückhalt von Kohlenwasserstoffen und Schwermetallen gewährleistet. Aufgrund der hohen Filterfunktion sowie der Reinigungs- und Regenerationsleistung ist der Einsatz des geoSTON[®] protect auch dort möglich, wo wasserdurchlässige Flächenbefestigungen bisher wegen zu hoher Schadstoffbelastung ausgeschlossen waren. Die Bettungs- und Tragschicht im Straßenaufbau muss eine Wasserdurchlässigkeit von $k_f \geq 5,4 \cdot 10^{-5}$ m/s besitzen [BDB96], um die Versickerung der höchstmöglichen Regenspende von 270 l/(s·ha) gewährleisten zu können [FBSLG02].

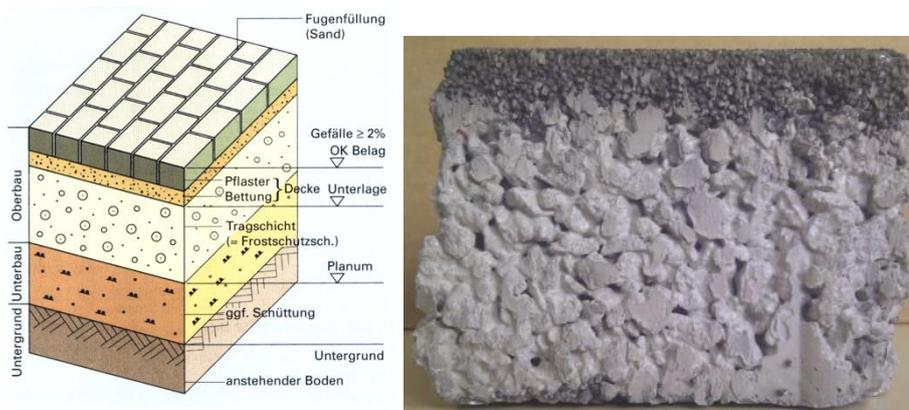


Abbildung 1: Wasserdurchlässig gestalteter Flächenbelag. Links: Blockdiagramm des Straßenaufbaus; Rechts: Foto des geoSTON[®] protect in anthrazit der Firma Heinrich Klostermann GmbH & Co. KG Betonwerke, Coesfeld.

In der Siedlungswasserwirtschaft erfolgte bisher nur eine grobe Abschätzung der Evaporation indirekt über den Abflussbeiwert [DWA02]. Bei einer wasserdurchlässig gestalteten Flächenbefestigung fließen 25 % des Niederschlagswassers oberflächlich (z.B. über die Kanalisation) ab, wohingegen 75 % über Benetzungs-, Mulden- und Versickerungsverlusten in der Fläche zurückgehalten werden können und verzögert versickern oder verdunsten können.

Eine genaue Beschreibung des Verdunstungsvorganges auf wasserdurchlässig gestalteten Flächenbefestigungen war bisher nicht möglich. Für den Raum Berlin wurde über Lysimetermessungen nachgewiesen, dass zwischen 20 % des Jahresniederschlags bei Asphalt und 40 % bei Rasengitterstein verdunsten [W01]. Mit der Evaporation ist ein erheblicher Energieaufwand verbunden, der für die Erwärmung der Atmosphäre nicht mehr zur Verfügung steht. Die niedrigeren Luft- und Strahlungstemperaturen über den verdunstungsaktiveren Flächen sind ein Beleg dafür [K04]. Der Einsatz von Straßenbegleitbäumen erhöht die Verdunstung im urbanen Raum durch Transpiration. Die tägliche Transpiration von Straßenbäumen beläuft sich pro Baum auf circa 400 Liter. Bei einer Wurzelgrundfläche von 10 x 10 m würde das einer Verdunstung von 4 mm/d entsprechen.

Tabelle 1: Mittlere Abflussbeiwerte (aus [DWA07]) sowie Verdunstung, Versickerung und Abfluss als Anteil am Niederschlag (aus [UBA09]).

Oberflächen	Abflussbeiwert ψ (-) [DWA07]	Verdunstung (%) [UBA09]	Versickerung (%) [UBA09]	Abfluss (%) [UBA09]
Steildach	0,9 – 1,0	15	0	85
Flachdach	0,9 – 1,0	25	0	75
Gründach	0,3 – 0,5	60	0	40
Asphalt	0,9	15	0	85
Pflaster	0,5 – 0,75	30	0	70
Durchlässiges Pflaster	0,25	8	80	12
Rasengittersteine	0,15			
Wassergebundene Deckschicht		30	20	50
Natürlich bewachsener Boden	0,0 – 0,1			

Nach ZIMMER (1999) kann ein 550 mm mächtiger Straßenaufbau bestehend aus haufwerksporigem Betonpflaster (8 mm), 2/5 Bettungsschicht (60 mm) und 0/45 Schotterschicht (410 mm) je nach Neigung bei starken Niederschlagsereignissen bis zu 10 mm Regenwasser zurückhalten.

Der Stand der Technik wird in Deutschland über die Leitlinien zur integralen Stadtentwässerung DWA-A100 [DWAi06], über die Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser DWA-M 153 [DWA07] und über Hinweise zur Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser DWA-A 138 [DWA05] und in Auszügen über die Bemessung der einzelnen Maßnahmen, speziell der Regenrückhalteräume DWA-A 117 [DWA06] geregelt. Für den Straßenbau gelten die Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen RSTO 01 [FGSV01], in denen die in Tabelle 2 aufgeführten Variationsmöglichkeiten in der Forschung bzw. Anforderungen an die Eigenschaften der Mineralstoffe für die Trag- und Bettungsschicht sowie für die Fugenfüllung bestehen.

Ziel des vorliegenden Antrages war es, die Eigenschaften der wasserdurchlässig gestalteten Flächenbefestigung (Aufbau und Zusammensetzung der Trag- und Bettungsschicht, Aufbau und Zusammensetzung des Pflastersteins, Fugenweite und -füllung, etc.) im Rahmen der geltenden Regelungen und Vorschriften und unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte insofern zu variieren bzw. zu optimieren, dass die Verdunstungsrate entsprechend groß und gleichmäßig ausfällt und sich der urbane Wasserkreislauf dem natürlichen Wasserkreislauf annähert.

Tabelle 2: Variationsmöglichkeiten der Eigenschaften der Mineralstoffe nach [FGSV04a] und [FGSV04b].

		Frostschuttschicht	Tragschicht	Bettungsschicht	Fuge
Rohdichte	DIN EN 1097-6	ist anzugeben für bestimmte Lieferkörnungsbereiche und Kornklassen			
Korngrößenverteilung	DIN EN 933-1	Innerhalb des Anforderungsbereiches nach TL SoB-StB 04 (Lage zwischen zwei definierten Kornsummenlinien)		BS 0/5 BS 0/8 NK 0/4 NK 0/8	BS 0/5 BS 0/8 NK 0/4 NK 0/8
		0/32, 0/42, 0/56			
Überkorn		≤ 10 %			
Unterkorn		-	-	6 % ± 3 % < 0,09	-
Gehalt an maximalen Feinanteilen (< 0,063 mm)	DIN EN 933-1	< 5 %	< 5 %	-	-
Qualität an Feinanteilen	DIN EN 933-8 + 9	nach TL Gestein StB 04 ab 3 % zu prüfen nach TL SoB-StB 04 bis 5 % Einbau möglich			
Kornform von groben Gesteinskörnungen	DIN EN 933-3 + 4	Kornformkennzahl ≤ 15		≤ 50	
		Plattigkeitskennzahl ≤ 50			
Anteil vollständig gebrochener und teilweise gebrochener Kornoberflächen an Gesteinskörnungen	DIN EN 933-5	keine Anforderung	90-100 %	Keine Anforderung	90-100 %
Anteil vollständig gerundeter Körner		keine Anforderung	0-3 %	Keine Anforderung	0-3 %
Wasseraufnahme als Kriterium für die Prüfung des Frostwiderstandes	DIN EN 1097-6	≤ 0,5 %			
Widerstand gegen Frostbeanspruchung	DIN EN 1367-1 + 2	≤ 4 % bei RC-Baustoffe > 4 % keine Anforderung an Magnesiumsulfat-Beanspruchung			
Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung	DIN EN 1367-1	wenn gefordert zu bestimmen und anzugeben			
Grobe organische Verunreinigungen	DIN EN 1744-1	zu bestimmen nach TL Gestein StB 04 (Punkt 2.2.18)			
Bemerkungen: BS: Brechsand-Splitt NK: Natursand-Kies Alle Prozentangaben in Massen-%					

Die Aufgabenstellung umfasst folgende Punkte. Nach einer Marktanalyse der verfügbaren Mineralstoffe wurden 19 verschiedene Mineralstoffe zur Verwendung als Tragschicht, Bettungsschicht oder Fugenfüllung hinsichtlich ihrer gesteinsgeometrischen und geohydraulischen Eigenschaften untersucht und fünf unterschiedliche Straßenaufbauten festgelegt. Im Labor wurden 25 Prototypen von Pflastersteinen entwickelt, die hinsichtlich des Aufbaus und der Zusammensetzung variieren. Die Variationen im Aufbau beziehen sich bei konstant einzustellenden Pflastersteinhöhen. In der Zusammensetzung beziehen sich die Variationen auf die Schichtigkeit (Vorsatz- und Kernbeton) sowie die Mächtigkeit der Vorsatzschicht; hinsichtlich der

Zusammensetzung wurden Zementart, Wasserzementwert, Porenvolumen bezogen auf den Rohgehalt, Gesteinskörnung (Kornform, Korngröße [minimale Korngröße, maximale Korngröße, Korngrößendifferenz], Kornmaterial) und Farbe durch unterschiedliche Beimengungen variiert. Alle Prototypen wurden hinsichtlich ihrer bodenphysikalischen, geohydraulischen und thermischen Eigenschaften untersucht und statistisch ausgewertet. Parallel zu diesen Laboruntersuchungen wurde basierend auf den Ergebnissen der Vorerkundung der Geländeversuch geplant, vorbereitet, aufgebaut, Feldmessgeräte installiert und die Messfelder geprüft. Für den ersten Geländeversuch wurden überwiegend marktübliche Straßenaufbauten verwendet und der Einfluss unterschiedlicher Tragschichten, der Pflastersteinfarben, der Vegetation und der Wasserdurchlässigkeit des Pflastersteins untersucht. Im zweiten Geländeversuch wurden ausgewählte, entsprechend optimierte Pflasterstein-Prototypen eingesetzt und der Einfluss der vollständigen Versiegelung durch abgedichtete Fugen und Asphaltierung untersucht. Zum Ende des zweiten Geländeversuches wurden auf den einzelnen Messfeldern der Versickerungsvorgang mittels Färbeversuch und die Wärmestrahlung der Messfelder mittels Wärmebildkamera untersucht sowie eine Hochwassersituation und „clogging“-Effekte auf den Feldern simuliert. Während der Versuchszeit wurden kontinuierlich die Klimadaten Niederschlag, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit und zeitweise Globalstrahlung erhoben und daraus die tatsächliche Verdunstung sowie die Grasreferenzverdunstung abgeleitet. Die tatsächliche Verdunstung wurde mit dem neuentwickelten TUV im Gelände ermittelt. Alle erhobenen Daten fanden zum Ende der Geländeversuche Eingang in die Berechnung der Wasserbilanz sowie in die Modellrechnungen zur Abschätzung des Verdunstungspotenzials durch den Einsatz optimierter Pflasterstein-Beläge im urbanen Raum. Zum Abschluss erfolgte eine betriebswirtschaftliche Kalkulation der Investitions- und Betriebskosten von wasserdurchlässigen Befestigungen von Verkehrsflächen und deren Entwässerungsanlagen.

3 Entwicklung verdunstungsoptimierter Pflastersteine

3.1 Laborversuche an Lockermaterialien

Insgesamt wurden 19 Mineralstoffe zusammengetragen. Die Mineralstoffe stammen vornehmlich aus dem nordwestdeutschen Raum und wurden bei Straßenbauunternehmen und teilweise auch direkt vom Steinbruchbetrieb erworben. In den Datenblättern aller zusammengetragenen Tragschicht-, Bettungsschicht- und Fugenmaterialien (Anhang 1.1) sind die Endergebnisse der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen aufgeführt.

10 der 19 Mineralstoffe sind für den Einbau als Tragschichtmaterial bestimmt. Diese Mineralstoffe zeichnen sich durch einen sehr weiten Korngrößenbereich nach TL SoB 2004 aus. Der „null-Anteil“ in diesen Mineralstoffen variiert dabei stark und das Größtkorn liegt bei 32 bis 45 mm. Diese grobe Körnung ermöglicht eine Lastverteilung bei größeren Auflasten, welche durch den Straßenverkehr zustande kommen.

Tabelle 3: Kennzeichen der Tragschichtmaterialien (n.b.: nicht bestimmt).

Tragschichtmaterial	Korngröße	Kornform	Material	Karbonatgehalt	Farbe
HKS 0/32	0/32	gebrochen	Hartkalkstein	karbonatisch	hellgrau/beige
Tragschicht NL	0/45	gebrochen + gerundet	Grauwanke + Quarz	n.b.	n.b.
Dränsand NL	1/3	gerundet	Quarz	n.b.	beige
Feld 4 (unterer Bereich LT-SoB)	0/32	gebrochen	Hartkalkstein	karbonatisch	hellgrau
Feld 5 (oberer Bereich LT-SoB)	0/32	gebrochen	Hartkalkstein	karbonatisch	hellgrau
RC 0/45	0/45	gebrochen	Bauschutt (Kalkstein, Ziegelreste, Keramik)	karbonatisch	bunt
HKS 0/45	0/45	gebrochen	Hartkalkstein	sehr karbonatisch	dunkelgrau
0/32 rot/grün ¹	0/32	gebrochen	Grauwanke	n.b.	n.b.
0/32 grün oben ²	0/32	gebrochen	Grauwanke	n.b.	n.b.
0/32 rot unten ³	0/32	gebrochen	Grauwanke	n.b.	n.b.

Die fünf ausgewählten Mineralstoffe für die Bettungsschicht sind deutlich feinkörniger als die Tragschichtmaterialien. Hier sind deutliche Unterschiede im Feinkornanteil die auffälligsten Unterscheidungsmerkmale. Die Korngrößenverteilung der Mineralstoffe reicht von 0/1,2 bis 2/5.

¹ Lage der Kornsummenlinien exakt zwischen den beiden Kornsummenlinien innerhalb des Anforderungsbereiches nach TL SoB-StB 04.

² Lage der Kornsummenlinien am oberen Rand des Anforderungsbereiches nach TL SoB-StB 04 mit hohem Feinkornanteil.

³ Lage der Kornsummenlinien am unteren Rand des Anforderungsbereiches nach TL SoB-StB 04 mit hohem Feinkornanteil.

Tabelle 4: Kennzeichen der Bettungsmaterialien (n.b.: nicht bestimmt).

Bettungsmaterial	Korngröße	Kornform	Material	Karbonatgehalt	Farbe
HKS 2/5-A	2/5	2/3 kubisch 1/3 plattig	Hartkalkstein	karbonatisch	hellgrau
HKS 2/5-B	2/5	½ kubisch ½ plattig	Hartkalkstein	karbonatisch	dunkelgrau (Pyritanteil)
Pflastermörtel	0,06/0,2	gerundet	Sand + Zement	n.b.	beige
Glasasche	0,06/10	gebrochen	abgeschreckte Gaswerkasche	n.b.	dunkelbraun- schwarz
Glasasche- Sand-Gemisch	30% Glasasche 70% Sand	Gemisch	Gemisch	n.b.	Gemisch

Die vier ausgewählten Mineralstoffe für die Fugenfüllung sind ähnlich feinkörnig wie die Mineralstoffe der Bettungsschicht. Die Korngrößenverteilung zeigt dabei aber ein sehr viel homogeneres Bild.

Tabelle 5: Kennzeichen der Fugenmaterialien.

Fugenmaterial	Korngröße	Kornform	Material	Karbonatgehalt	Farbe
Basaltsplitt 1/3	1/3	gebrochen	Basalt	n.b.	dunkelgrau- schwarz
Extensivsubstrat	0,061/6	gebrochen - gerundet	Rasen- tragschicht- gemisch	n.b.	braun
Gewaschener Sand 0/2	0/2	gerundet	Quarz	n.b.	beige
Füllsand	0/2	gerundet	Quarz mit organischen Anteilen	n.b.	ockerfarben mit dunklen Stellen

3.1.1 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1 dient dazu, den Gesamtcharakter einer Bodenprobe mittels Siebverfahren (Trocken- oder Nasssiebung) zu ermitteln. Die nach DIN EN 933-1 bestimmte Korngrößenverteilung für Tragschichten muss die klar definierten Anforderungen der TL SoB-StB 04 erfüllen.

Fast alle Lockermaterialien wurden trocken gesiebt. Vor der Siebung wurden die Proben im Trockenschrank bei 105°C bis zur Massenkonzanz getrocknet, um die Trockenmassen (m_d) ermitteln zu können. Die Analysensiebe weisen Maschenweiten von 45,0 mm, 31,5 mm, 22,4 mm, 16,0 mm, 11,2 mm, 8,0 mm, 5,0 mm, 2,0 mm, 0,71 mm, 0,25 mm, 0,09 mm und 0,063 mm auf (Anhang 1.2). Die Siebzeit betrug bei einer Schwingungsintensität von 9 Hz und bei einem Intervall von 9 sec. 10 Minuten. Im Anschluss an den Siebvorgang wurden die Siebrückstände (m_R) gewogen. Aus der Summe der Siebrückstände ($\sum m_R$) und der vor Siebbeginn bestimmten Trockenmasse (m_e) wurde der Siebverlust ($m_e - \sum m_R$) errechnet, welcher nicht mehr als 1% der Ausgangsmasse betragen darf. Des Weiteren wurde sowohl der prozentuale

Anteil der Rückstände ($m_R/\Sigma m_R \cdot 100$) als auch der prozentuale Anteil der Durchgänge an der Ausgangsmasse errechnet [K08].

Die Ergebnisse wurden als Körnungslinien (Anhang 1.2) mittels des Computerprogramms KVS dargestellt [K08]. Zudem ermittelte das Programm die Ungleichkörnigkeitszahl U , die die Neigung der Körnungslinie zahlenmäßig zum Ausdruck bringt, und die Krümmungszahl C_c , die die Krümmung der Körnungslinie kennzeichnet. Des Weiteren ermittelt das Programm die Bodenart nach DIN 4022. Die Körnungslinie wird zur Bestimmung der Filterstabilität (Kap. 3.1.6) herangezogen. Alle Ergebnisse können den im Anhang 1.1 aufgeführten Datenblättern sowie den Siebdaten im Anhang 1.2 entnommen werden.

Die Korngrößenverteilung der Mineralstoffe Tragschicht NL, RC 0/45, 0/32 rot/grün, 0/32 grün oben und 0/32 rot unten erfüllen die Anforderungen der TL SoB-StB 04. Die Korngrößenverteilungen der Mineralstoffe HKS 0/32, HKS 0/45 liegen leicht unterhalb der Anforderungen. Die Korngrößenverteilungen der Mineralstoffe Feld 4 (unterer Bereich der TL-SoB) und Feld 5 (oberer Bereich der TL-SoB) liegen leicht oberhalb der Anforderungen.

3.1.2 Über- und Unterkornanteile

Als Überkorn wird der Anteil eines Gemisches beschrieben, der auf dem größeren, die Korngruppe (laut Werksangabe) bezeichnenden Sieb liegen bleibt. Er muss für die Tragschicht nach TL SoB-StB 04 ≤ 10 M.-% sein (Kategorie OC_{90}). Der Überkornanteil wurde für alle Materialien aus der Korngrößenverteilung (Kap. 3.1.1) abgegriffen [K08]. Die Ergebnisse sind den im Anhang 1.2 aufgeführten Siebdaten zu entnehmen. Die Anforderungen wurden für alle Tragschichtmaterialien mit Ausnahme der Tragschicht NL erfüllt. Für die Mineralstoffe Tragschicht NL liegt das Überkorn bei 10,8 M.-%.

Als Unterkorn wird der Anteil eines Gemisches beschrieben, der auf dem Sieb mit 0,09 mm Durchmesser liegen bleibt. Er muss für die Bettungsschicht nach TL SoB-StB 04 6 M.-% ± 3 % betragen. Der Unterkornanteil wurde für die Materialien der Bettungsschicht aus der Korngrößenverteilung (Kap. 3.1.1) abgegriffen [K08]. Die Ergebnisse sind den im Anhang 1.2 aufgeführten Siebdaten zu entnehmen. Die Anforderungen sind meistens erfüllt. Für die Mineralstoffe in Feld 4 liegt das Unterkorn bei 5 M.-%, in Feld 4 und bei 0/32 rot/grün sowie 0/32 rot unten bei 6 M.-%, bei 0/32 grün oben bei 7 M.-% und für HKS 0/45 bei 8 M.-%.

3.1.3 Feinanteil

Der Feinanteil ist die Kornklasse eines Gemisches, die nach DIN EN 933-1 durch das 0,063 mm-Sieb hindurch geht. Der maximale Feinanteil $< 0,063$ mm muss für die Tragschicht nach TL SoB-StB 04 ≤ 5 M.-% sein (Kategorie UF_5). Anforderungen an den minimalen Feinanteil $< 0,063$ mm werden nicht gestellt. Für Bettungs- und Fugenmaterialien existieren keine Anforderungen. Der Feinanteil wurde aus der Korngrößenverteilung (Kap. 3.1.1) abgegriffen [K08]. Die Ergebnisse sind den im

Anhang 1.2 aufgeführten Siebdaten zu entnehmen. Die Tragschichtmaterialien erfüllen mit Ausnahme für Tragschicht NL und Feld 5 und 4 mit jeweils leicht erhöhten Feinanteilen von 6 M.-% und HKS 0/45 mit deutlich erhöhten Feinanteilen von 8 M.-% [K08] die Anforderungen.

3.1.4 Kornform

Die Plattigkeitskennzahl (F_l) konnte nur an den Materialien der Tragschicht nach DIN EN 933-3 bestimmt werden, da diese die nach DIN EN 933-3 geforderten Korngrößen zwischen 4 mm und 63 mm aufweisen. Die Plattigkeitskennzahl gibt den prozentualen Anteil plattiger Körner in der Messprobe an. Die Plattigkeitskennzahl darf nach TL SoB-StB 04 50 % nicht überschreiten (Kategorie F_{l50}). Die Siebung wurde mit sogenannten Stabsieben durchgeführt, durch deren Schlitze die plattigen Körner fallen [K08]. Die nicht-plattigen Körner bleiben als Siebrückstand zurück. Da keine Siebmaschine mit Stabsieben zur Verfügung stand, wurde die Siebung mit jedem Sieb als Handsiebung durchgeführt. Die Schlitzweite des Stabsiebes (in mm) beträgt die Hälfte des Korndurchmessers d_i (in mm) der zu prüfenden Kornklasse. Der Versuch zur Bestimmung der Plattigkeitskennzahl wurde nicht DIN-gerecht durchgeführt, da die geforderten Kornklassen nicht ausgesiebt werden konnten. Es wurden die Kornklassen verwendet, die durch die Siebung der Kornverteilung (Kap. 3.1.1) gewonnen wurden. Wie aus der Tabelle 6 ersichtlich ist, wurden einige Kornklassen mit 2 Stabsieben ausgesiebt. Die Kornklasse 22,4/31,5 mm wurde zum Beispiel mit dem Stabsieb 16,0 mm, der Siebdurchgang anschließend mit dem 12,5 mm Sieb ausgesiebt, da die Kornklasse sowohl Körner mit $d_i = 31,5$ mm und mit $d_i = 25$ mm enthält.

Tabelle 6: Ermittlung der Kornformkennzahl: Verwendete Kornklassen und Stabsiebe.

Kornklasse (mm)	Schlitzweite des Stabsiebes (mm)
31,5/45,0	20
22,4/31,5	16 und 12,5
16,0/22,4	12,5 und 10
11,2/16,0	8 und 6,3
8,0/11,2	6,6 und 5
5,0/8,0	4 und 3,15

Bei der Berechnung der Kornformkennzahl wurde die Masse des Siebdurchganges durch das 16,0 mm Stabsieb als Siebdurchgang des Siebes und als Masse der Kornklasse 20/25 mm berücksichtigt. Die Siebung der anderen Kornklassen erfolgte wie vorher beschrieben [K08]. Die Plattigkeitskennzahl F_{li} für jede Kornklasse wurde nach Gleichung 1 und die Gesamt-Plattigkeitskennzahl F_l nach Gleichung 2 bestimmt.

$$FI_i = \frac{m_{iSS}}{m_i} \cdot 100 \quad \text{Gl. 1}$$

$$FI = \frac{\sum m_{iSS}}{\sum m_i} \cdot 100 \quad \text{Gl. 2}$$

Die Bestimmung der Gesamt-Plattigkeitszahl wurde an neun Tragschichtmaterialien durchgeführt (Anhang 1.3). Die Ergebnisse für die Gesamt-Plattigkeitszahl liegen zwischen $FI = 26 \%$ und $FI = 30 \%$ (mit Ausnahme für HKS 0/45 mit $FI = 48 \%$) [K08] und damit erfüllen alle Tragschichtmaterialien die Anforderungen.

Die Kornformkennzahl (SI) kann an groben Gesteinskörnungen nach DIN EN 933-4 bestimmt werden; somit kamen nur die Materialien der Tragschicht in Betracht. Die Kornformkennzahl darf für die Tragschicht nach TL SoB-StB 04 15 % nicht überschreiten (Kategorie SI_{15}). Die Bestimmung der Kornformkennzahl erfolgte an den Kornklassen mit dem größeren Korndurchmesser $D \leq 63$ mm und dem kleineren Korndurchmesser $d \geq 4$ mm mit einem Kornformmessschieber, welcher einer handelsüblichen Schieblehre ähnelt [K08]. Die Körner der einzelnen Kornklassen wurden zuerst mit der längsten Seite in den Kornformmessschieber eingespannt, und es wurde dann versucht, ob das Korn mit der schmalsten Seite durch den zweiten Spalt passt. Fällt das Korn durch den Spalt, so handelt es sich um ein nicht-kubisches Korn. Fällt es nicht hindurch, liegt ein kubisches Korn vor. Ein kubisches Korn liegt somit vor, wenn das Verhältnis von Kornlänge L zu Korndicke E immer $L/E < 3$ ist. Dementsprechend ist das L/E -Verhältnis > 3 , wenn das Korn nicht kubisch ist. Körner, die erheblich von 3 abweichen, wurden ohne Kornformmessschieber aussortiert. Die durch Gleichung 3 für jede Kornklasse bestimmte Kornformkennzahl SI_i gibt den prozentualen Anteil nicht-kubischer Körner an der Messprobe an. Die Bestimmung der Kornformkennzahl für die gesamte Probe SI erfolgte über die Summe der Massen nach Gleichung 4.

$$SI_i = \frac{m_{inkK}}{m_i} \cdot 100 \quad \text{Gl. 3}$$

$$SI = \frac{\sum m_{inkK}}{\sum m_i} \cdot 100 \quad \text{Gl. 4}$$

Die Bestimmung der Gesamt-Kornformkennzahl wurde an acht Tragschichtmaterialien durchgeführt (Anhang 1.4). Die Ergebnisse liegen für die meisten Mineralstoffe mit bis zu $SI = 18 \%$ knapp außerhalb der Anforderungen der Kategorie SI_{15} . Die Mineralstoffe RC 0/45 und HKS 0/45 erfüllen die Anforderungen mit $SI = 41 \%$ nicht.

3.1.5 Kornoberfläche

Der Anteil gebrochener Körner in groben Gesteinskörnungen kann nach DIN EN 933-5 nur an Korngrößen zwischen 4 mm und 63 mm angewandt werden. Aus diesem Grund wurde das Verfahren nur mit den Tragschichtmaterialien durchgeführt. Der Anteil der vollständig gebrochenen und gebrochenen Kornoberflächen an der Gesteinskörnung muss für die Tragschicht nach TL SoB-StB 04 zwischen 90 % und

100 % liegen; der Anteil der vollständig gerundeten Körner muss für die Tragschicht nach TL SoB-StB 04 zwischen 0 % und 3 % liegen. Die Körner der zu untersuchenden Kornklasse wurden auf einer ebenen Oberfläche ausgebreitet und von Hand nach DIN EN 933-5 in

- gebrochene (c : „crushed“),
- vollständig gebrochene (tc : „total crushed“),
- gerundete (r : „rounded“) und
- vollständig gerundete (tr : „total rounded“)

Körner getrennt. Die Unterscheidung in vollständig gebrochene und gebrochene bzw. vollständig gerundete und gerundete Körnern ist nach DIN 933-5 nicht klar definiert und lag somit im Ermessen des Betrachters. Jede Gruppe wurde gewogen und ihre Massen notiert [K08]. Die Ergebnisse der jeweiligen Massenanteile C wurden mittels der Gleichung 5 ermittelt.

$$C_{(c,tc,r\ oder\ tr)} = \frac{m_{(c,tc,r\ oder\ tr)}}{m_i} \cdot 100 \quad \text{Gl. 5}$$

Die Bestimmung der Kornoberfläche wurde an neun Tragschichtmaterialien durchgeführt (Anhang 1.5). Die Ergebnisse zeigen, dass die Anteile der vollständig gebrochenen und gebrochenen Kornoberflächen zwischen $C = 94\ %$ und $C = 100\ %$ liegen [K08]. Der Anteil der vollständig gerundeten Körner ist immer $\leq 3\ %$ [K08]. Damit werden die Anforderungen von allen Tragschichtmaterialien erfüllt.

3.1.6 Filterstabilität

Unter Filterstabilität versteht man, dass das Korngerüst einer von Wasser durchströmten Schicht stabil bleibt. Das bedeutet, dass kein Material herausgelöst werden darf und in die angeströmte Schicht eingetragen wird. Ist keine ausreichende Filterstabilität gewährleistet, so kann die Tragfähigkeit des Materials gemindert sein, und es kann zu Setzungen kommen [PS06]. Eine ausreichende Filterstabilität des Bettungsmaterials und des Tragschichtmaterials untereinander ist laut ZTV SoB-StB 04 erbracht, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$D_{15}/d_{85} \leq 5$$

$$D_{50}/d_{50} \leq 25$$

Eine ausreichende Filterstabilität des Fugenmaterials und des Bettungsmaterials untereinander ist laut ZTV P-StB 2000 erbracht, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$D_{15}/d_{85} \leq 4$$

$$D_{50}/d_{50} \leq 10$$

Tabelle 7: Nachweis der Filterstabilität zwischen Tragschichtmaterial und Bettungsschichtmaterial; nach [K08].

Nachweis der Filterstabilität				
Tragschichtmaterialien	Bettungsschichtmaterialien	D_{15}/d_{85}	D_{50}/d_{50}	Nachweis der Filterstabilität
		≤ 5	≤ 25	
HKS 0/32	HKS 2/5-A	-	3,8	erbracht
HKS 0/32	HKS 2/5-B	-	3,5	erbracht
HKS 0/32	Pflastermörtel	1,1	6,9	erbracht
HKS 0/32	Glasasche	1,9	23,8	erbracht
HKS 0/32	Glasasche-Sand Gemisch	0,7	40,5	nicht erbracht
HKS 0/32	Gewaschener Sand	6,2	35,1	nicht erbracht
Tragschicht NL	HKS 2/5-A	-	0,7	erbracht
Tragschicht NL	HKS 2/5-B	-	0,8	erbracht
Tragschicht NL	Pflastermörtel	0,4	7,0	erbracht
Tragschicht NL	Glasasche	0,1	1,4	erbracht
Tragschicht NL	Glasasche-Sand Gemisch	0,1	4,7	erbracht
Tragschicht NL	Gewaschener Sand	0,4	8,0	erbracht
Dränsand NL	HKS 2/5-A	-	0,0	erbracht
Dränsand NL	HKS 2/5-B	-	0,0	erbracht
Dränsand NL	Pflastermörtel	0,1	0,2	erbracht
Dränsand NL	Glasasche	0,0	0,0	erbracht
Dränsand NL	Glasasche-Sand Gemisch	0,0	0,2	erbracht
Dränsand NL	Gewaschener Sand	0,1	0,3	erbracht
Feld 4 (Unterer Bereich)	HKS 2/5-A	-	0,8	erbracht
Feld 4 (Unterer Bereich)	HKS 2/5-B	-	0,8	erbracht
Feld 4 (Unterer Bereich)	Pflastermörtel	0,4	7,6	erbracht
Feld 4 (Unterer Bereich)	Glasasche	0,1	1,5	erbracht
Feld 4 (Unterer Bereich)	Glasasche-Sand Gemisch	0,1	5,2	erbracht
Feld 4 (Unterer Bereich)	Gewaschener Sand	0,4	8,8	erbracht
Feld 5 (oberer Bereich)	HKS 2/5-A	-	0,7	erbracht
Feld 5 (oberer Bereich)	HKS 2/5-B	-	0,7	erbracht
Feld 5 (oberer Bereich)	Pflastermörtel	0,3	6,9	erbracht
Feld 5 (oberer Bereich)	Glasasche	0,1	1,3	erbracht
Feld 5 (oberer Bereich)	Glasasche-Sand Gemisch	0,1	4,7	erbracht
Feld 5 (oberer Bereich)	Gewaschener Sand	0,4	7,9	erbracht
RC 0/45	HKS 2/5-A	-	1,8	erbracht
RC 0/45	HKS 2/5-B	-	1,7	erbracht
RC 0/45	Pflastermörtel	0,1	3,3	erbracht
RC 0/45	Glasasche	0,2	11,6	erbracht
RC 0/45	Glasasche-Sand Gemisch	0,7	19,7	erbracht
RC 0/45	Gewaschener Sand	0,6	17,0	erbracht
HKS 0/45	HKS 2/5-A	-	4,3	erbracht
HKS 0/45	HKS 2/5-B	-	4,0	erbracht
HKS 0/45	Pflastermörtel	0,2	7,9	erbracht
HKS 0/45	Glasasche	0,3	27,2	nicht erbracht
HKS 0/45	Glasasche-Sand Gemisch	1,3	46,3	nicht erbracht
HKS 0/45	Gewaschener Sand	1,1	40,1	nicht erbracht
0/32 rot/grün (BAG)	HKS 2/5-A	-	2,7	erbracht
0/32 rot/grün (BAG)	HKS 2/5-B	-	2,9	erbracht
0/32 rot/grün (BAG)	Pflastermörtel	0,8	27,1	nicht erbracht
0/32 rot/grün (BAG)	Glasasche	0,1	5,3	erbracht
0/32 rot/grün (BAG)	Glasasche-Sand Gemisch	0,2	18,4	erbracht
0/32 rot/grün (BAG)	Gewaschener Sand	0,9	31,3	nicht erbracht
0/32 grün oben (BAG)	HKS 2/5-A	-	1,7	erbracht
0/32 grün oben (BAG)	HKS 2/5-B	-	1,8	erbracht
0/32 grün oben (BAG)	Pflastermörtel	0,4	16,4	erbracht
0/32 grün oben (BAG)	Glasasche	0,1	3,2	erbracht
0/32 grün oben (BAG)	Glasasche-Sand Gemisch	0,1	11,1	erbracht
0/32 grün oben (BAG)	Gewaschener Sand	0,5	18,9	erbracht
0/32 rot unten (BAG)	HKS 2/5-A	-	2,3	erbracht
0/32 rot unten (BAG)	HKS 2/5-B	-	2,5	erbracht
0/32 rot unten (BAG)	Pflastermörtel	0,9	23,2	nicht erbracht
0/32 rot unten (BAG)	Glasasche	0,2	4,6	erbracht
0/32 rot unten (BAG)	Glasasche-Sand Gemisch	0,3	15,8	erbracht
0/32 rot unten (BAG)	Gewaschener Sand	1,1	26,8	nicht erbracht

Tabelle 8: Nachweis der Filterstabilität zwischen Bettungsschichtmaterial und Fugenmaterial; nach [K08].

Nachweis der Filterstabilität				
Bettungsschichtmaterialien	Fugenmaterial	D_{15}/d_{85}	D_{50}/d_{50}	Nachweis der Filterstabilität
		≤ 4	≤ 10	
HKS 2/5-A	Basaltsplitt 1/3	-	1,7	erbracht
HKS 2/5-B	Basaltsplitt 1/4	-	1,8	erbracht
Pflastermörtel	Basaltsplitt 1/5	-	0,9	erbracht
Glasasche	Basaltsplitt 1/6	-	0,3	erbracht
Glasasche-Sand Gemisch	Basaltsplitt 1/7	-	0,2	erbracht
Gewaschener Sand	Basaltsplitt 1/8	-	0,2	erbracht
HKS 2/5-A	Extensivsubstrat	0,7	7,8	erbracht
HKS 2/5-B	Extensivsubstrat	0,8	8,3	erbracht
Pflastermörtel	Extensivsubstrat	0,3	4,3	erbracht
Glasasche	Extensivsubstrat	0,1	1,2	erbracht
Glasasche-Sand Gemisch	Extensivsubstrat	0,1	0,7	erbracht
Gewaschener Sand	Extensivsubstrat	0,1	0,8	erbracht
HKS 2/5-A	Füllsand	5,3	22,5	nicht erbracht
HKS 2/5-B	Füllsand	4,7	21,1	nicht erbracht
Pflastermörtel	Füllsand	0,4	2,3	erbracht
Glasasche	Füllsand	1,9	11,6	nicht erbracht
Glasasche-Sand Gemisch	Füllsand	0,4	3,3	erbracht
Gewaschener Sand	Füllsand	0,4	2,0	erbracht
HKS 2/5-A	Gewaschener Sand	2,6	10,7	nicht erbracht
HKS 2/5-B	Gewaschener Sand	3,0	11,5	nicht erbracht
Pflastermörtel	Gewaschener Sand	1,0	5,9	erbracht
Glasasche	Gewaschener Sand	0,2	1,7	erbracht
Glasasche-Sand Gemisch	Gewaschener Sand	0,2	1,0	erbracht
Gewaschener Sand	Gewaschener Sand	0,2	1,2	erbracht

Die Korndurchmesser mit den entsprechenden Siebdurchgängen wurden aus der Korngrößenverteilung (Kap. 3.1.1) abgegriffen [K08]; die Bestimmung erfolgte nach DIN 18196. Der Nachweis der Filterstabilität wurde für alle 19 Mineralstoffe durchgeführt. Die Ergebnisse sind in nachfolgenden Tabelle 7 und Tabelle 8 zusammengefasst. Für die tatsächlich im Geländeversuch eingebauten Kombinationen (farblich unterlegt in den beiden Tabellen) wurde der Nachweis der Filterstabilität immer erbracht.

3.1.7 Korndichte

Die Korndichte nach DIN 18124 ist eine Kenngröße des Festkörpers, die zur Bestimmung des Porenanteils einer Kornprobe in den nachfolgenden Proctorversuchen nach DIN 18127 benötigt wird. Hierzu gibt es keine speziellen Anforderungen. Die Korndichte ist – nicht zu verwechseln mit der Rohdichte (Tabelle 2) – nach DIN EN 1097-6 die Dichte eines porösen Festkörpers einschließlich der Porenräume. Die Bestimmung der Korndichte erfolgt im Kapillarpyknometer an einer bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Probe mit einem Größtkorn bis ca. 5 mm. Für Proben mit einem Größtkorn von größer ca. 5 mm wird das Weithalspyknometer nach DIN 18124 verwendet.

Die Korndichte ρ_s ist definiert als das Verhältnis der Trockenmasse m_d der Probe zu dessen Volumen V_k :

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_k}$$

Gl. 6

Die Korndichte ρ_s eines Materials wird durch die Bildung des Mittelwertes aus den Trockendichten von drei Teilproben ermittelt. Die Bestimmung der Korndichte wurde in einer Dreifachbestimmung an 8 verschiedenen Lockermaterialien des Tragschicht-, Bettungs- und Fugenmaterials durchgeführt. Die Ergebnisse können den Datenblättern im Anhang 1.6 entnommen werden.

Die Bestimmung der Korndichte wurde an allen 18 Mineralstoffen durchgeführt (Anhang 1.6). Die höchste Korndichte der beprobten Mineralstoffe besitzt der Basaltspalt 1/3 mit $\rho_s = 2,88 \text{ g/cm}^3$. Der Hartkalksteinschotter HKS 2/5-A, mit einer Dichte von $\rho_s = 2,71 \text{ g/cm}^3$, unterscheidet sich deutlich von dem Hartkalksteinschotter HKS 2/5-B mit einer Korndichte von $\rho_s = 2,64 \text{ g/cm}^3$. Dies überrascht, da aufgrund des Pyritanteils im HKS 2/5-B die höhere Korndichte hätte angenommen werden können. Die Korndichten der übrigen Mineralstoffe liegen im Bereich von $\rho_s = 2,64 \text{ g/cm}^3$ bis $2,56 \text{ g/cm}^3$ und zeigen keine Besonderheiten.

3.1.8 Proctordichte

Die Proctordichte wurde mittels Proctorversuch nach DIN 18127 bestimmt. Mit Hilfe des Proctorversuches ist es möglich, den für die maximal erreichbare Lagerungsdichte (= Proctordichte) notwendigen Wassergehalt zu bestimmen, bei dem der Untergrund beim Einbau auf der Baustelle eine optimale Festigkeit und Tragfähigkeit erreichen kann. Diese mechanische Verdichtung einer Bodenprobe im Labor entspricht der auf Baustellen mit dem mittelschweren Verdichtungsgerät erreichbare Lagerungsdichte.

Für die Materialien der Bettungsschicht mit einem Größtkorn von maximal 20,0 mm, wurden mindestens 3 kg der Probe in einem Versuchszylinder mit Durchmesser $d = 100 \text{ mm}$ (P100) mittels leichtem Verdichtungsgerät mit einem Fallgewicht von $m = 2500 \text{ g}$ und einer Fallhöhe von $h = 300 \text{ mm}$ in drei Lagen mit jeweils 25 Schlägen untersucht. An den Materialien der Tragschicht mit einem Größtkorn im Bereich von 20,0 mm bis 31,5 mm wurden mindestens 6 kg Probenmaterial in einem Proctorzylinder mit $d = 150 \text{ mm}$ (P150) mittels mittelschwerem Verdichtungsgerät mit einem Fallgewicht von $m = 4500 \text{ g}$ und einer Fallhöhe von $h = 450 \text{ mm}$ in drei Lagen mit jeweils 22 Schlägen untersucht. Alle Versuche erfolgten ohne Verwendung der Stahlplatte [Wesc08].

Die acht unterschiedlichen sandigen Materialien der Bettungsschichten zeigen bei unterschiedlichen Wassergehalten Proctordichten zwischen $\rho_{Pr} = 1,58 \text{ g/cm}^3$ und $\rho_{Pr} = 1,92 \text{ g/cm}^3$. Bei den Materialien der Tragschicht konnte lediglich für den Hartkalksteinschotter HKS 0/32 eine Proctordichte von $\rho_{Pr} = 2,13 \text{ g/cm}^3$ ermittelt. Die Proctordichte der Materialien HKS 0/45 und RC 0/45 konnte aufgrund der Kornzertrümmerung und damit einhergehender Dichtezunahme nicht ermittelt werden [Wesc08]. Der optimale Wassergehalt sowie die weiteren Ergebnisse sind den Datenblättern im Anhang 1.1 sowie dem Anhang 1.7 zu entnehmen.

3.1.9 Wasserdurchlässigkeit

Die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts der Lockermaterialien erfolgte nach DIN 18130-1 mit nach oben gerichteter Strömungsrichtung bei stationärem hydraulischen Gefälle (Abbildung 2). Von den Bettungs- und Tragschichtmaterialien wird ein Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von $k_f \geq 5,4 \cdot 10^{-5}$ m/s gefordert, um die Versickerung der höchstmöglichen Regenspende von 270 l/(s·ha) gewährleisten zu können [FBSLG02].

Aus einem Vorratsgefäß strömt Wasser von unten nach oben durch die Filterprobe. Der konstante Wasserspiegel in dem Vorratsgefäß wird durch einen kapazitiven Füllstandssensor mit gekoppeltem Ventil gewährleistet. Dieser reguliert den Wassernachstrom aus einem Wasserreservoir oberhalb der Versuchsanlage, sobald der Wasserspiegel aufgrund der Infiltration des Wassers in die Probe sinkt. Das Wasserreservoir ist vor jedem Versuch mit genügend Wasser zu befüllen. Die Durchströmung von unten nach oben hat den Vorteil, dass die im Porenraum auftretende Gasphase leichter entweichen kann und dadurch den Wasserstrom nicht behindert. Das Filtrat verlässt die Probe nach oben durch einen PVC-Schlauch und wird in einem Messzylinder aufgefangen. Hierbei wird die Zeit Δt gestoppt, in der ein festgelegtes Wasservolumen aus der Filterprobe ausgetreten ist. Die hydraulische Druckhöhe h wird durch den senkrechten Abstand zwischen dem Wasserspiegel in dem Reservoir und dem höchsten Punkt des Schlauches bestimmt. Hierbei ist der Mittelpunkt des Schlauchquerschnittes maßgebend [Wesc08].

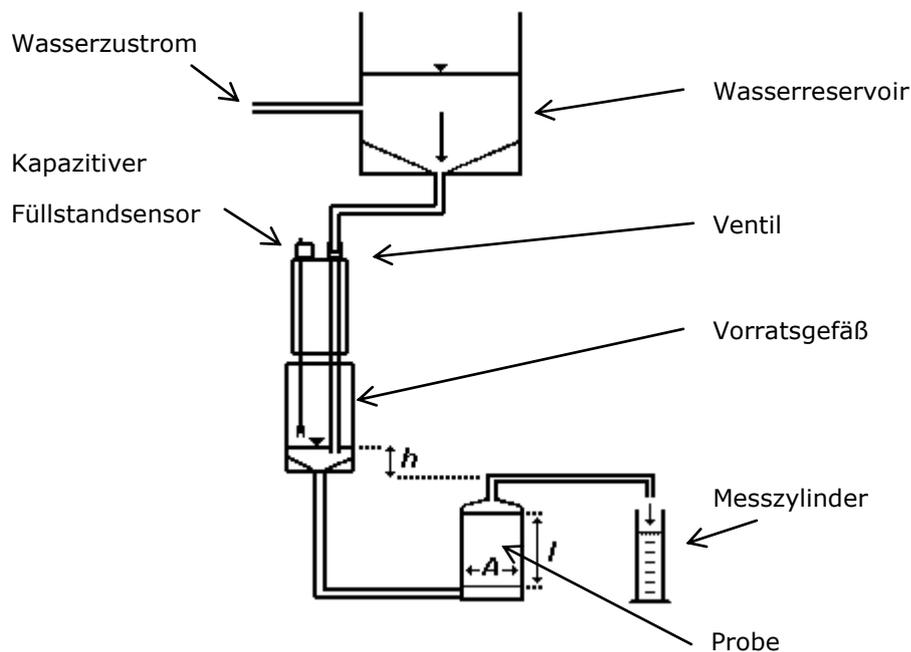


Abbildung 2: Versuchsanordnung zur Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts mit stationärer hydraulischer Druckhöhe [Wesc08].

Die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwerts wird an Proben mit maximaler Lagerungsdichte durchgeführt. Hierzu werden die Haufwerksproben auf den im Proctorversuch nach DIN 18127 (1997) ermittelten optimalen Wassergehalt w_{pr} angefeuchtet und verdichtet. An den Proctortopf werden anschließend eine Bodenplatte mit

Wasserzulauf und ein Deckel mit Abfluss angeschraubt und mitsamt Filterprobe in die Versuchsanordnung eingebaut [Wesc08].

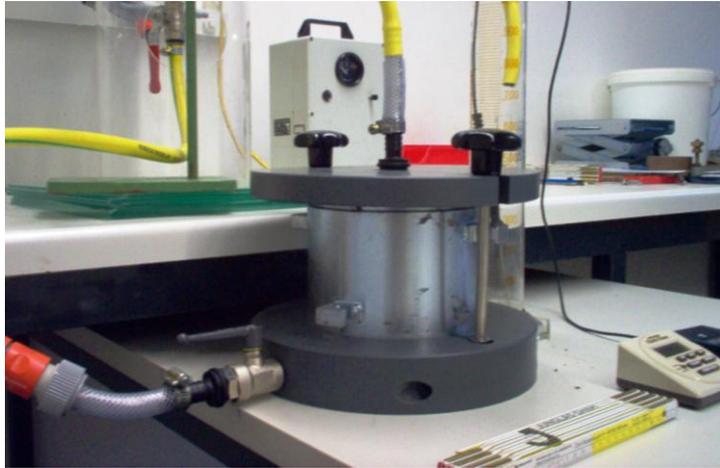


Abbildung 3: Proctortopf P150 zur Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von Proben mit Größtkorn $d < 31,5$ mm [Wesc08].

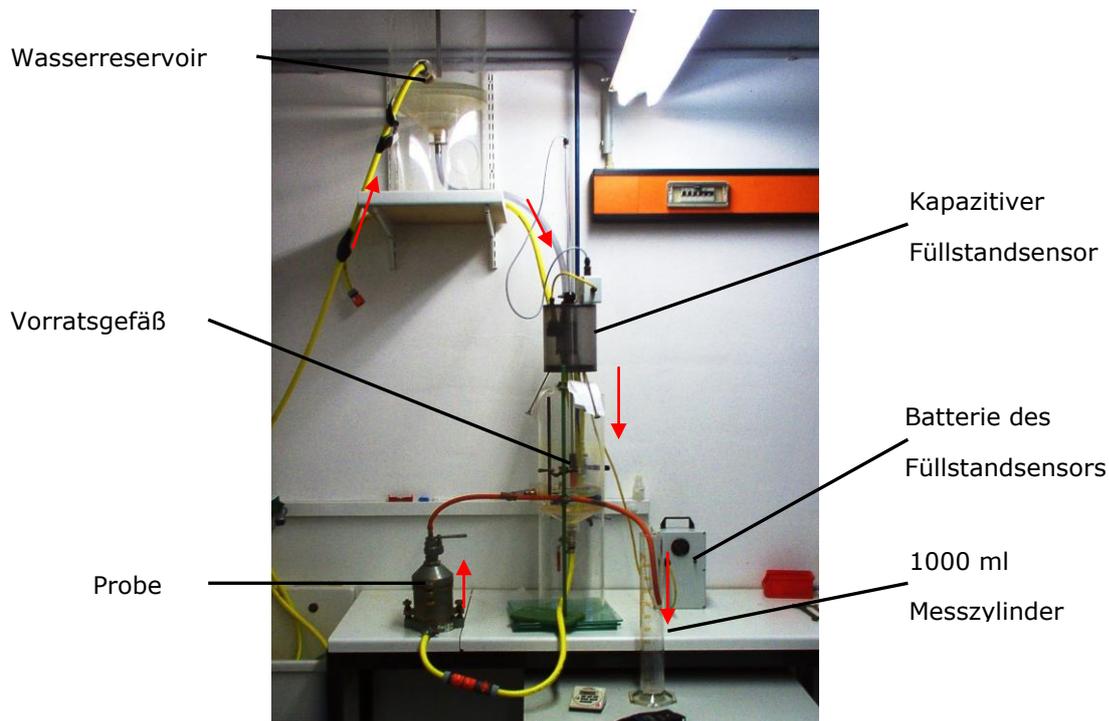


Abbildung 4: Versuchsanordnung zur Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von Proben mit Größtkorn $d < 20$ mm im Proctortopf P100 (Pfeile zeigen in Fließrichtung) [Wesc08].

Die Größe des verwendeten Proctortopfes ist von dem Größtkorn des verwendeten Materials abhängig. Nach DIN 18127 wird für eine Probe mit dem Größtkorn $d < 20,0$ mm ein Versuchszylinder mit einem Durchmesser von $d = 100$ mm (P100) verwendet. Dieser besitzt eine Querschnittsfläche von $A = 78,53$ cm² und eine Fließlänge von $l = 120$ mm (Abbildung 3). Für Proben mit $d = > 20,0$ mm bis 31,5 mm wird

ein Versuchszylinder mit $d = 150$ mm (P150) benutzt. Dessen Querschnittsfläche beträgt $A = 176,71$ cm², die Fließlänge $l = 125$ mm (Abbildung 4) [Wesc08].

An einer Filterprobe wird in insgesamt drei Versuchsdurchgängen der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert bestimmt. Hierzu werden die Zeitabstände Δt gemessen, in der ein festgelegtes Wasservolumen aus der Filterprobe in den Messzylinder ausfließt. Treten dreimal in Folge dieselben Zeitabstände auf, kann auf eine kontinuierliche Durchströmung geschlossen und die Messung des jeweiligen Durchganges beendet werden [Wesc08]. Die Bestimmung der Durchlässigkeit ist an allen Mineralstoffen durchgeführt worden (Anhang 1.8).

Das Bettungsmaterial wurde im verdichteten Zustand nach DIN 18127 auf die Wasserdurchlässigkeit geprüft. Die Ermittlung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts k_f nach DIN 18130-1 zeigt, dass mit Ausnahme des Pflastermörtels und des Sand-Glasasche-Gemisches alle Bettungsmaterialien einen hinreichend hohen Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f \geq 5,4 \cdot 10^{-5}$ m/s, bzw. mögliche flächenbezogene Infiltrationsraten von $\dot{V} \geq 270$ l/(s·ha) aufweisen. Die höchsten Durchlässigkeitsbeiwerte treten bei Hartkalksteinschotter HKS 2/5 mm auf. Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert des HKS 2/5-A beträgt $k_f = 4,24 \cdot 10^{-2}$ m/s, was einer möglichen flächenbezogenen Infiltrationsrate von ca. 35.367,77 l/(s·ha) entspricht und die Anforderung somit um ein Vielfaches übersteigt. Die Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte des HKS 2/5-B ist mit $k_f = 3,82 \cdot 10^{-2}$ m/s geringfügig geringer, was vermutlich auf den beobachteten höheren Anteil an Körnern < 1 mm zurückzuführen ist. Sowohl der Basaltsplitt 1/3, als auch der Füllsand 0/2 besitzen einen Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 3,31 \cdot 10^{-2}$ m/s und sind damit als Bettungsmaterial geeignet. Die Eignung des gewaschenen Sandes 0/2 mm ist fragwürdig, da der Durchlässigkeitsbeiwert nach DIN 18130-1 mit $k_f = 4,43 \cdot 10^{-5}$ m/s geringfügig unter der Anforderung liegt, diese aber hinsichtlich ihrer möglichen flächenbezogenen Infiltrationsrate mit $\dot{V} = 273,04$ l/(s·ha) erfüllt [Wesc08].

Als ungeeignet erweisen sich das Sand-Glasasche-Gemisch und der Pflastermörtel. Der Durchlässigkeitsbeiwert des Sand-Glasasche-Gemisches beträgt ca. $k_f = 3,53 \cdot 10^{-5}$ m/s, bzw. flächenbezogener Versickerungsrate $\dot{V} = 147,03$ l/(s·ha). Im Durchlässigkeitsversuch mit dem Pflastermörtel konnte auch nach einer Messdauer $\Delta t = 20$ Minuten mit einer hydraulischen Druckhöhe $\Delta h = 1$ cm kein Wasserdurchfluss in der Durchflusszelle festgestellt werden. Dies ist vermutlich auf den Zementanteil zurückzuführen, der das Wasser bindet und einen Durchfluss verhindert [Wesc08].

Die Untersuchungen zeigen, dass die Durchlässigkeitsbeiwerte der Tragschichtmaterialien ausreichen, um die geforderte Versickerung zu gewährleisten. Die sehr heterogenen Mineralstoffgemische RC 0/45 und HKS 0/32 zeigen relativ ähnliche Durchlässigkeitsbeiwerte von ca. $k_f = 9,75 \cdot 10^{-4}$ m/s, bzw. $k_f = 8,96 \cdot 10^{-4}$ m/s und eignen sich somit optimal als durchflusswirksames Tragschichtmaterial. Den effektivsten Durchlässigkeitsbeiwert der Tragschichtmaterialien weist, aufgrund der höheren nutzbaren Porosität, der HKS 0/45 mit $k_f = 7,66 \cdot 10^{-3}$ m/s auf [Wesc08].

Abschließend ist festzuhalten, dass die Durchlässigkeitsbeiwerte der Tragschichtmaterialien unter denen der Bettungsmaterialien liegen.

3.1.10 Wasseraufnahme- und Wasserhaltevermögen

Das Wasseraufnahme- und Wasserhaltevermögen der Lockermaterialien entscheidet über die Menge an Regenwasser, die im Straßenaufbau nach einem Regenereignis zurückgehalten werden kann. Da es keine allgemein gültigen Vereinbarungen hinsichtlich einer Methode zur Bestimmung und Bewertung des Wasseraufnahme- und Wasserhaltevermögens gibt, wurde die nachfolgend beschriebene Versuchsdurchführung entwickelt. Spezielle Anforderungen an das Wasseraufnahme- und Wasserhaltevermögen werden nicht gestellt.

Die Probe wird zu Beginn der Untersuchungen nach DIN 18127 mit zuvor eingestelltem optimalen Wassergehalt w_{Pr} verdichtet (Kap. 3.1.8) und die Masse der feuchten Probe m_f bestimmt. Anschließend wird die verdichtete Probe in die Wasserdurchlässigkeitszelle eingebaut und von unten nach oben mit Wasser durchströmt. Dies ist notwendig, da die Probe bei einer Befüllung von oben aufgrund der enthaltenen Porenluft nicht gesättigt werden kann. Ist eine vollständige Sättigung erreicht, wird der Zylinderdeckel mit dem Wasserauslass abgenommen, die Probe mit mehreren Lagen Celophanfolie abgedeckt und mit der Bodenplatte des Proctortopfes fest verschlossen. Die Folie dient hierbei der Abdichtung des Proctortopfes. Anschließend wird der gesamte Topf umgedreht, der Boden der Durchlässigkeitszelle abgeschraubt und die Probe mit einer Spritzflasche nochmals vorsichtig mit Wasser gesättigt. Die Masse $m_{w,sat}$ entspricht der Masse der verdichteten, wassergesättigten Bodenprobe abzüglich der Masse des vollständigen Proctortopfes [Wesc08]. Das Wasseraufnahmevermögen nach DIN 1097-6 gilt u.a. als Kriterium für die Prüfung des Frostwiderstandes (Kap. 3.1.12).

Der Boden der Durchlässigkeitszelle wird nach der Wägung wieder angeschraubt, die Probe umgedreht und die Bodenplatte des Proctortopfes entfernt. Das Porenwasser kann nun gravitativ über den Wasserablauf ablaufen. Ist für mindestens 10 Minuten kein Wasseraustritt am Wasserablauf mehr zu erkennen, so ist das maximale Wasserhaltevermögen aufgrund der Kapillarmenischen und Wasserfilme erreicht. Zur Bestimmung der Masse der wasserteilgesättigten Probe $m_{w,teilsat}$ wird eine Auffangschale der Siebmaschine auf den offenen oberen Zylinderrand gedrückt und die Probe erneut umgedreht. Der Boden der Durchlässigkeitszelle wird wieder entfernt und die Masse der Bodenprobe mitsamt Proctorzylinder und Schale gewogen. Die Probe wird anschließend aus dem Zylinder gelöst und im Trockenofen bis zur Gewichtskonstanz getrocknet [Wesc08].

Das Wasseraufnahmevermögen w_{WAV} berechnet sich aus dem Verhältnis des bei Wassersättigung enthaltenen Wassers $m_{w,sat}$ zu der Trockenmasse m_d des Bodens:

$$w_{WAV} = \frac{m_{w,sat} - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad \text{Gl. 7}$$

Analog berechnet sich das Wasserhaltevermögen w_{WHV} aus dem Verhältnis der Masse des kapillar gehaltenen Porenwasser $m_{w,teilsat}$ zu der Trockenmasse m_d des Bodens:

$$w_{\text{WHV}} = \frac{m_{\text{w,teilsat}} - m_{\text{d}}}{m_{\text{d}}} \cdot 100$$

Gl. 8

Die Bestimmung der Wasseraufnahme- und -haltevermögen ist an allen Mineralstoffen durchgeführt worden (Anhang 1.9). Die Ergebnisse zeigen, dass erwartungsgemäß das Wasseraufnahmevermögen einer Schicht mit großem Porenanteil stärker ausgeprägt ist als bei einer relativ dichten Schicht mit geringem Porenanteil. Demgegenüber ist das Wasserhaltevermögen aufgrund der Kapillarmeniskens des Wassers und der Wasserfilme umso größer, je feinkörniger ein Material ist. Anhand der Versuchsreihe ist festzustellen, dass die Materialien mit einem Hauptgemenganteil im Korngrößenbereich von Sand, in verdichteter Lagerung, ein Wasseraufnahmevermögen von ca. 16 % bis 19 % in Relation zum Trockengewicht der jeweiligen Probe besitzen. Der Anteil an dem gegen die Schwerkraft gehaltenem Wasser liegt nur um ca. einen Prozent darunter. Beim gewaschenen Sand ist ein Wasseraustritt kaum erkennbar. Der Wassergehalt dieser Probe nach vollständiger Sättigung und nach dem Abtropfen differiert um nur 0,1% [Wesc08].

Mit Zunahme der vertretenen Korngrößen steigt das Wasseraufnahmevermögen, wohingegen das Wasserhaltevermögen kontinuierlich abnimmt.

Die Glasasche besitzt nach vollständiger Sättigung einen Wassergehalt von $w_{\text{WAV}} = 21,9\%$ und nach dem Abtropfen $w_{\text{WHV}} = 13,2\%$. Diese Differenz vergrößert sich in der Messreihe vom Basaltsplitt 1/3 über die HKS 2/5 kontinuierlich. Die sehr grobkörnigen Materialien HKS 0/32 und HKS 0/45 zeigen ein geringeres Wasseraufnahmevermögen als die feinkörnigeren HKS 2/5, was an den höheren Gehalten an Nebengemenganteilen in Sandkorngröße hervorgerufen werden könnte.

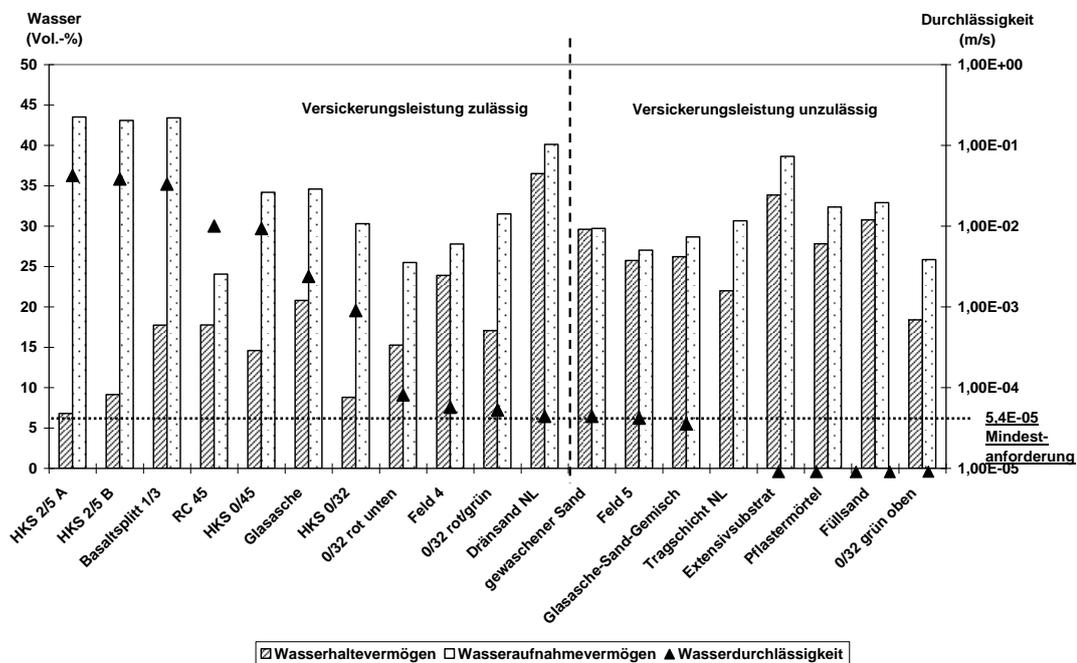


Abbildung 5: Wasseraufnahme- und Wasserhaltevermögen (Gew.-%) sowie Wasserdurchlässigkeitsbeiwert (m/s) der untersuchten Materialien.

Es ist somit festzuhalten, dass besonders die Tragschichtmaterialien mit der Korngrößenverteilung 0/32 und 0/45 selbst in verdichteter Lagerung eine kapillarbrechende Eigenschaft besitzen und nur in sehr geringem Maße Wasser gegen die Schwerkraft halten können. Von den Bettungsmaterialien eignen sich vor allem HKS 2/5, Basaltsplitt 1/3 und die Glasasche hinsichtlich ihrer Nutzung für wasserdurchlässige Flächenbefestigungen.

3.1.11 Kapillare Steighöhe

Im Untergrund auftretendes Wasser kann durch Oberflächenspannungen gegen die Schwerkraft gehalten oder aufsteigen. Dieses sogenannte Kapillarwasser tritt nach DIN 4049-3 oberhalb des Grundwasserraumes auf und bildet den Kapillarraum, der in einen geschlossenen und einen offenen Kapillarwasserbereich unterschieden wird. Der geschlossene Kapillarraum ist vollständig mit Wasser gesättigt. Die Wassersättigung des offenen Kapillarraumes beträgt ungefähr 60 % bis 80 % [SK94]. Im Straßenbau ist die kapillare Steighöhe von großer Bedeutung, da sich diese sowohl auf die Frostempfindlichkeit des Oberbaus auswirkt sowie Schrumpfsetzungen und Vegetationsschäden bei Grundwasserabsenkung verzögern kann [P97, Wesc08]. Je höher der Gehalt an Feinanteilen (Kap. 3.1.3) ist, desto größer ist die kapillare Steighöhe.

Da eine Methode zur Bewertung der kapillaren Steighöhe h_k nicht durch das Deutsche Institut für Normung e.V. vorgegeben ist, wurde eine eigene Versuchsdurchführung entwickelt.

In ein Wasserbad, dessen Wasserspiegel durch einen kapazitiven Füllstandssensor konstant gehalten wird, wird senkrecht ein PVC-Rohr gestellt, welches die Bodenprobe enthält (Abbildung 6). Um ein Herausfallen der Probe zu verhindern, steht das Rohr auf einem Sieb mit der Maschenweite 0,4 mm. Der Kapillarraum im Rohr besitzt eine Länge von $l = 75$ cm und einen inneren Durchmesser von $d = 4$ cm. Der kapillare Wasseraufstieg wird über einen Zeitraum von mindestens 3 h beobachtet. Um die Grenzfläche des Kapillarwassersaumes besser feststellen zu können, wird dem Wasser ein blauer Farbstoff zugegeben [Wesc08].

Das PVC-Rohr wird auf ca. 2/3 der Rohrbreite längs angesägt, so, dass man ein Sichtfenster öffnen kann. Dies ist sinnvoll, um die Probe nahe der Rohrwand abzukratzen und den Kapillarwasser-Aufstieg im Inneren der Probe zu kontrollieren. Aufgrund der Adhäsionskräfte an der Rohrwand ist dort der Kapillarwassersaum höher als in den zentralen Bereichen; dieser Randeffect ist zu beachten. Die Höhe des Kapillarsaums im zentralen Bereich spiegelt die kapillare Steighöhe h_k wider [Wesc08].

Aufgrund des zu geringen Innendurchmessers des PVC-Rohres, konnten die Materialproben nicht mit einem normierten Verdichtungsgerät nach DIN 18127 verdichtet werden. Von einem Material wurden fünf Lagen in das PVC-Rohr eingebracht, die jeweils durch 10 gleichmäßige Schläge eines Hammers auf ein Vierkantholz mit der Fläche $A = 7,84$ cm² verdichtet wurden. Der Hammer besitzt eine Masse von $m = 2266,1$ g. Als Fallhöhe wurde $h = 15$ cm bestimmt, aus der der Hammer ohne zusätzlich Krafteinwirkung frei auf das Vierkantholz fallen gelassen wurde [Wesc08].

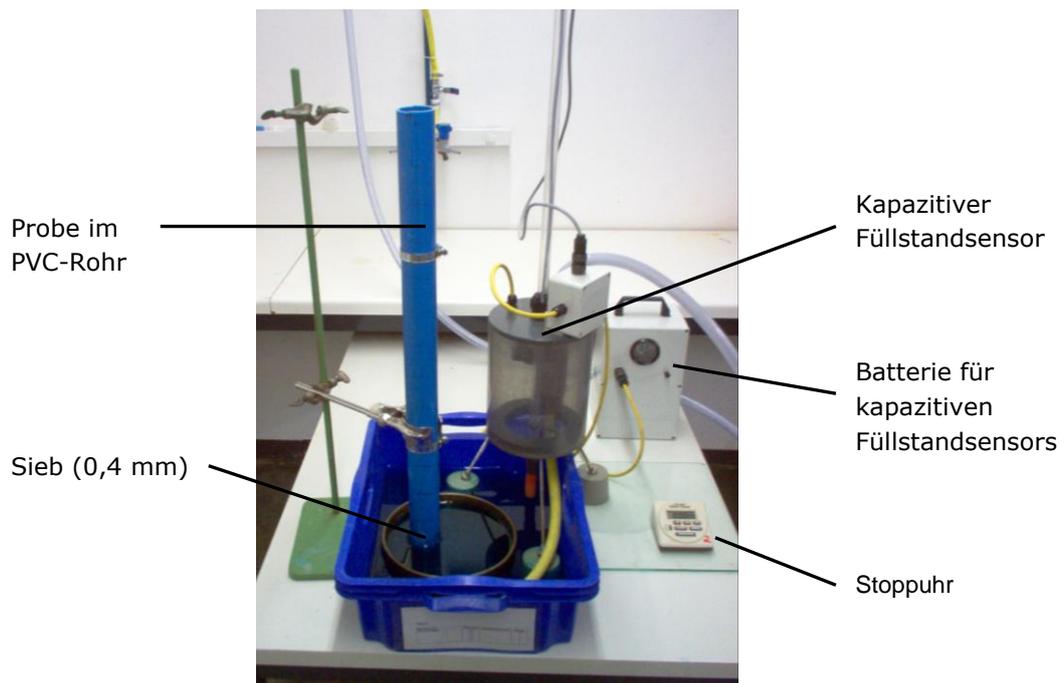


Abbildung 6: Versuchsanordnung zur Messung des kapillaren Wasseraufstiegs [Wesc08].

Bei der Versuchsdurchführung ergaben sich Probleme (Variabilitäten bei der Probenvorbereitung, uneinheitliche Verdichtung, Auswölbungen des PVC-Rohres, ungenaue Ermittlung der maximalen Steighöhe durch undurchsichtiges PVC-Rohr, keine Ermittlung der kapillaren Aufstiegsgeschwindigkeit möglich), die zu Ungenauigkeiten der Messwerte führen. Trotz der erwähnten Ungenauigkeiten, ließ sich mit dieser Versuchsanordnung eine relativ hohe Kapillarität der feinkörnigen Materialien im Bezug zu den grobkörnigen Materialien feststellen.

Die Bestimmung der kapillaren Steighöhe wurde an ausgewählten Mineralstoffen durchgeführt (Anhang 1.10). Den höchsten Wasseranstieg zeigt der gewaschene Sand 0/2 mit einer Aufstiegshöhe von $h_K = 32,2$ cm innerhalb von ca. 3 h. Das Sand-Glasasche-Gemisch, welches ungefähr fünfmal so lange beprobt wurde ($\Delta t = 15,8$ h), besitzt ein Aufstiegshöhe von $h_K = 33,5$ cm. Im Füllsand 0/2 konnte das Wasser innerhalb von ca. 17,5 h ca. 21,2 cm aufsteigen. Der Basaltsplitt 1/3 und die Glasasche zeigten innerhalb von jeweils ca. $\Delta t = 5,5$ h einen kapillaren Wasseraufstieg von $h_K = 13,0$ cm bzw. $h_K = 10,8$ cm. Der HKS 0/32 besitzt mit ca. 10 cm Aufstiegshöhe eine relativ hohe Kapillarkraft, die vermutlich auf dessen Anteil feinkörniger Partikel im Korngrößenbereich von Schluff zurückzuführen ist. HKS 2/5-A und HKS 2/5-B zeigen ähnliche kapillare Aufstiegshöhen, die allerdings, wegen ihres relativ engen Korngrößenspektrums ohne Schluffanteil, unterhalb der Steighöhe von HKS 0/32 liegen. Durchschnittlich steigt das Wasser in den HKS 2/5 innerhalb von $\Delta t = 3,5$ h ungefähr $h_K = 6$ cm. Im Pflastermörtel konnte kein Wasseraufstieg nachgewiesen werden, da dies vermutlich der Zementanteil verhinderte. HKS 0/45 und das RC 0/45 konnten aufgrund ihrer Größtkörner nicht in dem PVC-Rohr beprobt werden. Der Vergleich von dem bodenfeuchten Füllsand 0/2 ($h_K = 21,2$ cm) mit dem ofengetrocknetem Füllsand 0/2 ($h_K = 43,2$ cm), welche jeweils für ca. 17,5 h beprobt

wurden, zeigte, dass die Kapillarkraft des Wassers in der trockenen Probe ungefähr doppelt so groß ist [Wesc08].

3.1.12 Prüfung der Frostsicherheit

Die Prüfung des Frostwiderstandes wurde an ausgewählten Mineralstoffen der geplanten Straßenaufbauten nach [FGSV04a] durchgeführt. Die Frostsicherheit wurde über den Widerstand gegen Frostbeanspruchung nach DIN EN 1367-1 bestimmt. Eigentlich gilt das Wasseraufnahmevermögen als erstes Kriterium für die Prüfung des Frostwiderstandes (Kapitel 3.1.10). Da das Wasseraufnahmevermögen aller Materialien aber den Grenzwert des Wasseraufnahmevermögens von 0,5 M.-% (Kategorie W_{cm} 0,5) übersteigt, wurde die Frostsicherheit nach DIN EN 1367-1 nachgewiesen.

Für den Frost-Tau-Wechselfersuch nach DIN EN 1367-1 wurde die Kornklasse 8/16 nach DIN EN 933-2 ausgesiebt und in 3 Einzelmessproben á 2000 g geteilt. Die Messproben wurden in nahtlos gezogene Blechdosen gefüllt und 24 h mit destilliertem Wasser versetzt. Es standen insgesamt nur 5 Blechdosen zur Verfügung; somit konnte der Versuch an einem Material nur mit 2 Einzelmessproben durchgeführt werden. Der Frost-Tau-Wechselfersuch wurde durch die Firma Roxeler Ingenieurgesellschaft mbH durchgeführt. Die mit destilliertem Wasser versetzten Proben wurden zunächst für 17 h bei $-17,5^{\circ}\text{C}$ in einer Kälttruhe gelagert, danach in einem Wasserbad bei 20°C aufgetaut und dort 7 h gelagert. Dieser Wechsel erfolgte insgesamt 10-mal. Anschließend wurden die Proben im Bodenmechanischen Labor der Universität Münster bis zur Massenkonstanz m_d getrocknet und mit einem 4 mm und einem 0,71 mm Analysensieb gesiebt. Die Massen der Rückstände – insbesondere im 4 mm Analysensieb $m_{im\ 4\ mm\ Sieb}$ – wurden notiert. Die durch den Frost-Tau-Wechsel gegebenenfalls hervorgerufenen Absplitterungen F wurden nach Gleichung 6 berechnet [K08].

$$F = \frac{m_d - m_{im\ 4\ mm\ Sieb}}{m_d} \cdot 100 \quad \text{Gl. 9}$$

Die Frost-Tau-Wechselfersuche wurden für fünf Materialien (HKS 0/32, Feld 4, Feld 5, RC 0/45 und HKS 0/45) durchgeführt (Anhang 1.11). Alle Materialien konnte der Kategorie F4 mit einem Verlust durch Absplitterung von ≤ 4 M.-% zugeordnet werden.

3.1.13 Saugspannung

Die Saugspannung ist ein Maß für die Bindungsintensität des Wassers an den Boden. Indem die Kapillarmeniken und Wasserfilme einer Spannung ausgesetzt werden, wird all das Wasser aus der Probe getrieben, dessen Bindungsfestigkeit geringer ist, als die angelegte Spannung [HH09]. Die Messung erfolgt üblicherweise in cm Wassersäule (cmWS) oder MPa [B07]. Da die Saugspannung jedoch von der Bodenart abhängig ist und in mehreren Potenzen variiert, wird zur Beschreibung der

Saugspannung der negative dekadische Logarithmus, der als pF-Wert bezeichnet wird ($pF = \log \text{ cm WS}$), verwendet [HC09].

Die Beziehungen zwischen der Saugspannung (pF) und dem Wassergehalt (Vol.-%) werden durch die Saugspannungskurve oder pF-Kurve beschrieben. Ein beispielhaftes Saugspannungs-Diagramm, das die pF-Kurven für die Bodenarten Sand, Schluff und Ton zeigt, ist in Abbildung 7 dargestellt.

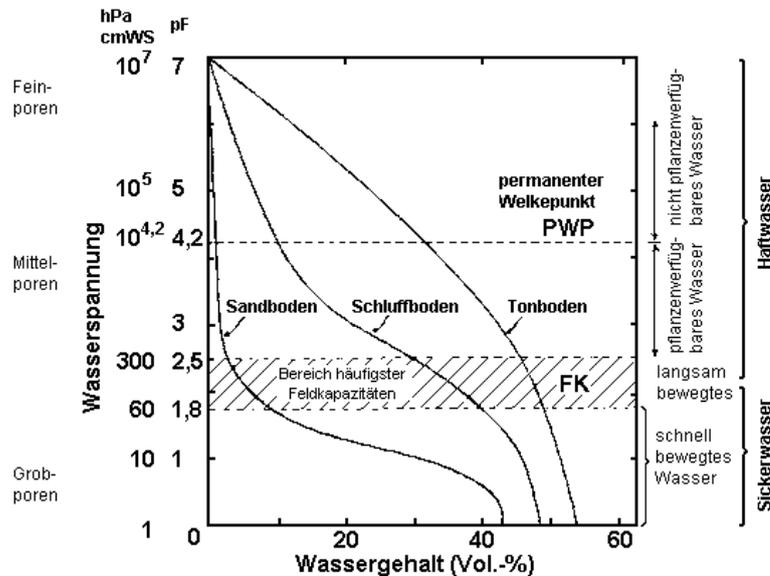


Abbildung 7: Saugspannungsdiagramm mit pF-Kurven für die Böden Sand, Schluff und Ton [SS02].

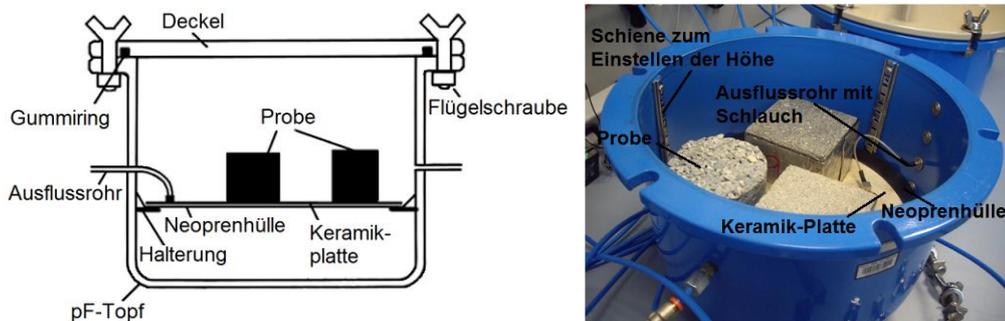


Abbildung 8: Skizze eines pF-Topfes (links) und geöffneter pF-Topf mit eingesetzter Keramik-Platte und Proben (rechts) [R11].

Zur Ermittlung der Saugspannung stehen mehrere identische Hochdrucktöpfe, sog. pF-Töpfe aus massivem Edelstahl im Bodenphysikalischen Labor des Institutes für Landschaftsökologie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster zur Verfügung. Die pF-Töpfe haben einen Durchmesser von 40 cm und ein Fassungsvermögen von ca. 12 Litern. Ihre maximale Druckbelastung liegt bei 14,9 bar. Die Proben werden auf porösen, keramischen Platten, die als Filter dienen, in die pF-Töpfe gestellt, in denen ein zuvor festgelegter Druck erzeugt werden kann. An der Unterseite der Keramik-Platten ist eine Neoprenhülle angebracht, die an den Seiten leicht übersteht und so ablaufendes Wasser auffängt. Zwischen der Keramik-Platte und der Neoprenhülle wird das Wasser, das aus den Poren der Platte austritt, gesammelt und

durch einen Schlauch, der mit dem Ausflussrohr des Topfes und der Keramik-Platte verbunden ist, aus dem Topf nach außen geleitet (Abbildung 8) [R11].

Um möglichst viele Proben gleichzeitig messen zu können, werden mehrere pF-Töpfe mit 3-Wege-Ventilen in Reihe geschaltet und an die zentrale Drucksteuerungsanlage, an der der entsprechende Druck eingestellt wird, angeschlossen [R11].

Vor Versuchsbeginn werden die Proben und Keramik-Platten mindestens 24 h gewässert, um einen Lufteinschluss in den Poren zu vermeiden. Durch das Wässern der Keramik-Platten wird vermieden, dass die Hochdruckluft in die Poren der Platten und somit direkt aus den pF-Töpfen heraus strömen kann. Nach dem Wässern können die Keramik-Platten direkt in die Töpfe eingelegt werden, während die Proben zunächst in einem mit destilliertem Wasser gefüllten Eimer auf eine Vibrationsmaschine gestellt werden, um die letzte verbliebende Luft aus den Poren zu treiben. Anschließend wird durch Wägung mit einer Ablesegenauigkeit von 0,1 g das Sättigungsgewicht der Proben $m_{W,sat}$ bestimmt, bevor sie dann auf die Keramik-Platten in die pF-Töpfe gestellt werden. Mit Hilfe eines kleinen Schlauches wird das Ausflussrohr des Topfes mit der Keramik-Platte in Verbindung gebracht (Abbildung 8). Die Töpfe werden mit einem schweren Stahldeckel und jeweils sechs Flügelschrauben fest verschlossen. Die Töpfe werden durch einen Gummiring luftdicht verschlossen (Abbildung 8) [R11].

An der zentralen Steuerungsanlage kann nun der gewünschte Druck in bar eingestellt werden. Die Messungen erfolgen bei pF 1,8 (0,06 bar), pF 2,5 (0,3 bar), pF 3 (1 bar) und pF 4,2 (15 bar). Da es sich bei dem pF-Wert um den negativen dekadischen Logarithmus des Druckes in hPa oder cmWS handelt, lässt sich der einzustellende Druck für die pF-Stufen folgendermaßen berechnen [HC09]:

$$\text{pF1,8: } 10^{1,8} \approx 60 \text{ hPa} = 0,06 \text{ bar}$$

$$\text{pF 2,5: } 10^{2,5} \approx 300 \text{ hPa} = 0,3 \text{ bar}$$

$$\text{pF3: } 10^3 \approx 1000 \text{ hPa} = 1 \text{ bar}$$

$$\text{pF4,2: } 10^{4,2} \approx 15000 \text{ hPa} = 15 \text{ bar}$$

Neben dem Druck wird noch ein Schwankungsbereich eingestellt, der festlegt, wie weit der Druck ansteigen oder abfallen kann, bevor entsprechend Luft abgelassen oder zugeführt wird, um den Druck in dem vorgegebenem Schwankungsbereich konstant zu halten. Durch regelmäßige Zwischenwägungen wird die Abnahme des Wassergehaltes in den Proben ermittelt, bis dieser schließlich konstant ist. Für die ersten Messungen sollten kurze Intervalle gewählt werden, um die deutliche Veränderung des Wassergehaltes zu Beginn der Messung festhalten zu können. Je nachdem, wie schnell die Proben noch Wasser abgeben, können die Messintervalle in größeren Abständen gewählt werden [R11].

Vor Beginn jeder Messung muss zunächst der Druck vom System genommen werden. Dafür wird das Steuerungsmodul ausgeschaltet und die einzelnen Schrauben werden nach und nach gelockert, so dass die Luft langsam aus den Töpfen entweichen kann. Das Entweichen der Luft ist an einem lauten Pfeifen zu erkennen. Erst wenn keine Luft mehr entweicht, können die Töpfe vollständig geöffnet werden. Die Proben werden dann einzeln entnommen und direkt in einen Messbehälter überführt,

um sicherzustellen, dass das evtl. noch aus der Probe heraustropfende Wasser aufgefangen und in die Wägung mit einbezogen wird. Nach der Wägung werden die Proben direkt wieder in die pF-Töpfe gestellt. Wurden alle Proben ausgewogen, werden die Töpfe wieder fest verschlossen und das Steuerungsmodul eingeschaltet, so dass sich der vorgegebene Druck in den Töpfen wieder einstellt. Jeder Messvorgang läuft auf die gleiche Weise ab. Während der Messungen sollte darauf geachtet werden, dass diese recht zügig ablaufen, damit die Proben schnell wieder dem entsprechenden Druck ausgesetzt werden [R11].

Die Fugenmaterialien Basaltsplitt 1/3 und Füllsand 0/2 wurden jeweils einmal bei pF 1,8 und dreimal bei pF 2,5 gemessen. Bei pF 3 wurde der Basaltsplitt zweimal und der Füllsand einmal gemessen (Tabelle 9). Die Ergebnisse sind Anhang 1.12 zu entnehmen.

Tabelle 9: Auflistung der verschiedenen Messreihen für die Lockermaterialien.

pF-Stufe	Zeitraum	Proben
1,8	15.09.10 - 01.10.10	3x Basaltsplitt, 3x Füllsand
	24.08.10 - 10.09.10	3x Basaltsplitt, 3x Füllsand
2,5	07.10.10 - 05.11.10	2x Basaltsplitt, 3x Füllsand
	07.12.10 - 07.04.11	2x Basaltsplitt, 3x Füllsand
3	08.06.10 - 24.06.10	3x Basaltsplitt
	01.12.10 - 07.04.11	1x Basaltsplitt, 2x Füllsand

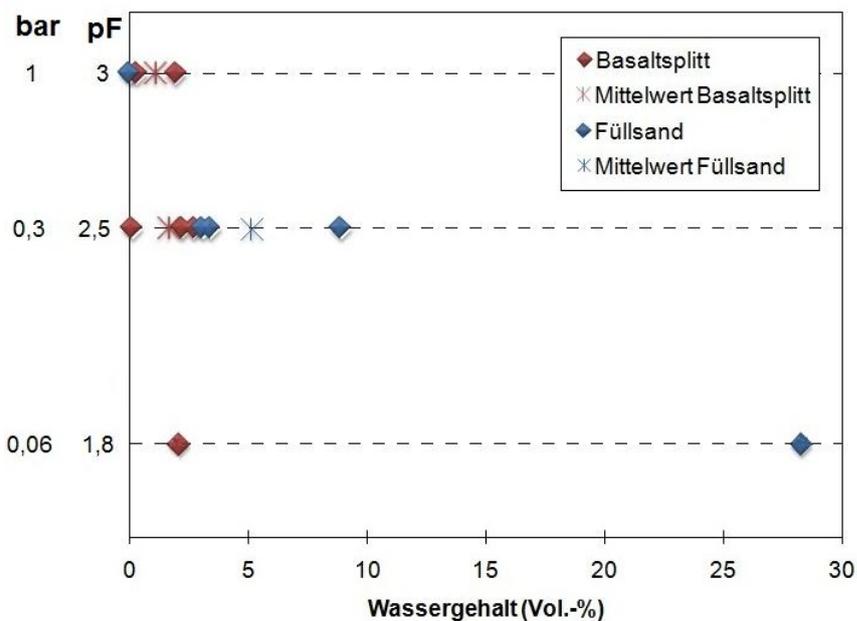


Abbildung 9: Saugspannungsdiagramm für die Fugenmaterialien Basaltsplitt 1/3 und Füllsand 0/2 [R11].

Für den Basaltsplitt 1/3 ist keine eindeutige Abnahme des Wassergehaltes mit zunehmendem Druck zu erkennen. Das bedeutet, dass der Basaltsplitt nur sehr geringe Wassermengen für die Verdunstung zur Verfügung stellen kann. Beim Füllsand nimmt der Wassergehalt eindeutig mit steigendem Druck ab; dadurch stellt ein Füllsand als Fugenmaterial größere Wassermengen für die Verdunstung zur Verfügung (Abbildung 9). Dies kann sich aber negativ auf die Frostbeständigkeit der Pflasterfläche auswirken.

3.1.14 Thermische Eigenschaft

Die thermischen Eigenschaften der Mineralstoffe lassen sich mittels der Wärmeleitfähigkeit, der volumenbezogene Wärmekapazität und der Temperaturleitfähigkeit (entspricht der Wärmediffusivität) beschreiben. Alle drei Eigenschaften sind stark vom Wassergehalt des Lockermaterials abhängig [SS02].

Die Wärmeleitfähigkeit λ beschreibt die Fähigkeit des Materials Wärme zu speichern und abzugeben [B07]. Die Einheit ist $W/(m \cdot K)$. Die Wärmeleitfähigkeit ist abhängig von der Mineralart der Gesteinskörnung, dem Mineralgehalt, der Porosität und dem Wassergehalt und die Temperatur. Die Wärmeleitfähigkeit schwankt zwischen 1 – 4 $W/(m \cdot K)$ für Wassergesättigten und 0,2 – 0,4 $W/(m \cdot K)$ für trockenen Boden. Die Wärmeleitfähigkeit von Quarz ist 3-4-mal höher als bei anderen Mineralen, deshalb ist der Quarzgehalt der Gesteinskörnung entscheidend. Mit zunehmendem Porenanteil reduziert sich die Wärmeleitfähigkeit, die für Wasser ($\lambda = 0,6 W/(m \cdot K)$ bei Raumtemperatur) und Luft ($\lambda = 0,025 W/(m \cdot K)$) ist sehr gering.

Die volumenbezogene Wärmekapazität c_p , die das Produkt aus der spezifischen Wärmekapazität c (in $kJ/(kg \cdot K)$) und der Dichte ρ (in kg/m^3) ist, gibt die Wärmemenge an, die benötigt wird um eine Volumeneinheit Boden um eine Wärmeeinheit zu erwärmen [SS02]. Sie wird in $J/(m^3 \cdot K)$ angegeben. Die volumenbezogene Wärmekapazität schwankt zwischen $1,3 \cdot 10^6 J/(m^3 \cdot K)$ für trockenen Sandboden mit einer Dichte von $1,65 \cdot 10^3 kg/m^3$ und $1,8 \cdot 10^6 J/(m^3 \cdot K)$ für feuchten Sandboden mit einer Dichte von $1,75 \cdot 10^3 kg/m^3$. Die Wärmekapazität von Wasser ist beinahe doppelt so hoch wie die von den meisten Mineralen und Eis (bei $0^\circ C$ $c_p = 1,8 \cdot 10^6 J/(m^3 \cdot K)$), wohingegen die Wärmekapazität von Luft ($c_p = 1,31 \cdot 10^3 J/(m^3 \cdot K)$) zu vernachlässigen ist.

Die Temperaturleitfähigkeit a beschreibt die Geschwindigkeit mit der sich Temperaturunterschiede eines Stoffes oder zwischen verschiedenen Bodentiefen ausbreiten. Dabei wird der Temperaturunterschied umso schneller ausgeglichen, je größer a für einen Boden ist [HK05]. Die Temperaturleitfähigkeit wird in m^2/s angegeben. Die Temperaturleitfähigkeit schwankt zwischen $0,2 \cdot 10^{-6} m^2/s$ für trockenen Sandboden und $0,33 \cdot 10^{-6} m^2/s$ für feuchten Sandboden. Die Wärmekapazität von Wasser ist beinahe doppelt so hoch wie die von den meisten Mineralen und Eis (bei $0^\circ C$ $c_p = 1,8 \cdot 10^6 J/(m^3 \cdot K)$), wohingegen die Wärmekapazität von Luft ($c_p = 1,31 \cdot 10^3 J/(m^3 \cdot K)$) zu vernachlässigen ist.

Die Wärmeleitfähigkeit λ und die volumenbezogene Wärmekapazität c_p wurden mit dem Messgerät ISOMET 2104 HEAT TRANSFER ANALYZER (I-HTA) der Firma

Applied Precision (Bratislava, Slowakei) gemessen. Die Temperaturleitfähigkeit a ist der Quotient aus Wärmeleitfähigkeit λ und volumenbezogener Wärmekapazität c_p . Für die Messungen standen eine Oberflächensonde für harte Materialien und eine Nadelsonde für weiche Materialien zur Verfügung. Der Messbereich der Wärmeleitfähigkeit liegt zwischen $0,015 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und $0,70 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ mit einer Genauigkeit von 5% ($+0,001 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) des Messwerts und zwischen $0,70 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und $6,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ mit einer Genauigkeit von 10% des Messwerts. Der Messbereich der volumenbezogenen Wärmekapazität liegt zwischen $4,0\cdot 10^4 \text{ J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ und $4,0\cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ bei einer Genauigkeit von 15% ($+1,10^3 \text{ J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$) des Messwerts. Die Messungen laufen in einem Temperaturbereich zwischen -20°C und $+70^\circ\text{C}$ mit einer Genauigkeit von 1% des Messwerts ab.

Um die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt der Pflastersteine zu testen, wurden von [F10] drei Szenarien festgelegt: Im ersten Szenario (S1) wird die zuvor bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknete Probe nach Abkühlung auf Raumtemperatur gemessen. Die thermischen Eigenschaften basieren hier nur auf die Gesteinskörnung, deren Körner sich an den Kontaktpunkten berühren. Im zweiten Szenario (S2) wird die Probe zunächst wieder getrocknet und auf Raumtemperatur abgekühlt. Anschließend wird sie in Folie verpackt, so dass nur noch die Oberfläche der Probe frei ist. Dann werden 20 ml destilliertes Wasser, die einer Niederschlagsmenge von 27 mm entsprechen, mit einer Spritze gleichmäßig auf der Oberfläche der Probe verteilt. In diesem Szenario wird die Gesteinskörnung von einer dünnen Schicht von Adsorptionswasser überzogen. Teilweise bildet sich Porenwinkelwasser in der Umgebung der Kontaktpunkte aus. An diesen Stellen kann sich die Wärmeleitfähigkeit deutlich erhöhen. Im dritten Szenario (S3) wird die Probe im vollgesättigten Zustand gemessen, nachdem sie über einen Zeitraum von 24 h gewässert wurde. Vollständig wassererfüllte Poren erhöhen weiterhin – wenngleich deutlich langsamer – die Wärmeleitfähigkeit. Die Proben wurden für jedes Szenario dreimal gemessen, um Fehler während der Messungen zu minimieren. Zwischen den einzelnen Messvorgängen wurden sie über einen Zeitraum von 24 h bei 105°C im Trockenschrank getrocknet.

Die thermischen Eigenschaften der einzelnen Mineralstoffe wurden mit Hilfe der Nadelsonde gemessen. Dafür wurden die Lockermaterialien in einen Stechzylinder gefüllt und nach unten mit einem Kunststoffdeckel geschlossen. Die Nadelsonde wurde zentral in das Lockermaterial eingebracht. Bevor der eigentliche Messvorgang beginnt, wird in einer Optimierungsphase ermittelt, mit welcher Rate die von der Sonde eingebrachte Wärmeenergie erhöht wird, um sicher zu stellen, dass die Messung optimal verläuft. Während des eigentlichen Messvorgangs wird von der Sonde ein Wärmestrom induziert und von Temperatursensoren die Wärmeströme, die von der Wärmequelle durch die Probe gelangen, erfasst. Nach ca. 10 min ist der Messvorgang beendet und das Gerät gibt die Wärmeleitfähigkeit λ , die volumenbezogenen Wärmekapazität C_p , und die Temperaturleitfähigkeit a an. Die Ergebnisse können über das interne Display oder mittels einer seriellen RD232-Schnittstelle mit dem Computer ausgelesen werden.

Die Wärmeleitfähigkeit λ , die volumenbezogenen Wärmekapazität c_p und die Temperaturleitfähigkeit a wurden jeweils an einem Mineralstoff dreimal in den drei be-

schriebenen Szenarien S1 (trockene Probe), S2 (feuchte Probe) und S3 (gesättigte Probe) gemessen.

Die Werte für die Wärmeleitfähigkeit λ liegen zwischen 0,17 und 0,26 W/(m·K) (S1), zwischen 0,27 und 0,68 W/(m·K) (S2) und zwischen 0,53 und 2,54 W/(m·K) (S3). Die Wärmeleitfähigkeit nimmt also mit steigendem Wassergehalt zu. Die Werte steigen jedoch nicht für jeden Mineralstoff um den gleichen Faktor an. Für die Szenarien S1 und S2 zeigt das Basaltsplitt-Sand-Gemisch die höchste Wärmeleitfähigkeit λ . Für das Szenario S3 zeigt der Füllsand die höchste Wärmeleitfähigkeit λ . Für den Basaltsplitt ist die Wärmeleitfähigkeit meistens am geringsten.

Für die volumenbezogenen Wärmekapazität c_p liegen die Werte zwischen $1,43 \cdot 10^6$ und $1,49 \cdot 10^6$ J/(m³·K) (S1), zwischen $1,43 \cdot 10^6$ und $1,59 \cdot 10^6$ J/(m³·K) (S2) und zwischen $1,54 \cdot 10^6$ und $2,56 \cdot 10^6$ J/(m³·K) (S3). Auch die volumenbezogenen Wärmekapazität c_p nimmt mit steigendem Wassergehalt – insbesondere beim Übergang zum Szenario S3 - zu. Für alle drei Szenarien zeigt der Füllsand immer die höchsten und der Basaltsplitt immer die geringsten volumenbezogenen Wärmekapazitäten an.

Der Füllsand zeigt mit Werten von $a = 0,99 \cdot 10^{-6}$ m²/s (S3) und das Basaltsplitt-Sand-Gemisch sowie das Extensivsubstrat mit $a = 0,68 \cdot 10^{-6}$ m²/s (S3) die höchste Temperaturleitfähigkeit. Die Temperaturleitfähigkeit a nimmt ebenfalls mit zunehmendem Wassergehalt zu. Alle anderen Szenarien zeigen mit Werten $< 0,43 \cdot 10^{-6}$ m²/s sehr geringe Temperaturleitfähigkeiten an (Abbildung 10). Die Temperaturleitfähigkeit der Lockermaterialien fällt geringer aus als die der Pflastersteine (Kap. 3.2.11).

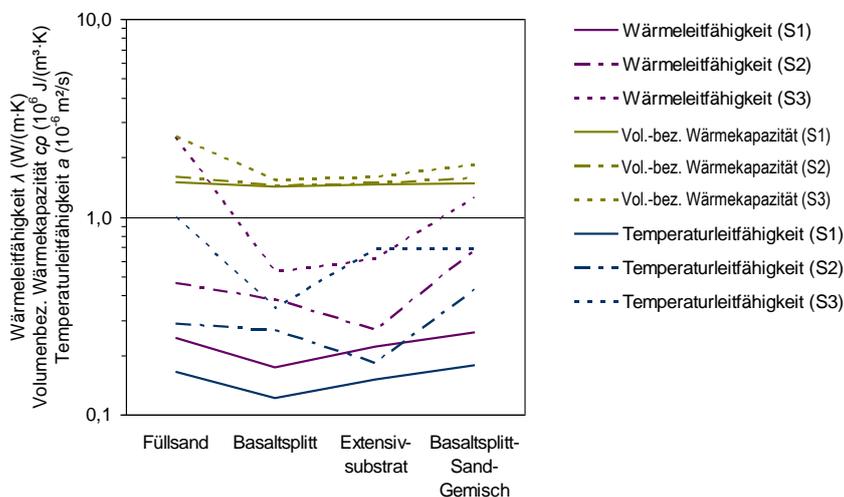


Abbildung 10: Ergebnisse der Messung der thermischen Eigenschaften an vier Mineralstoffen für drei Feuchteszenarien (Wärmeleitfähigkeit λ (W/(m·K)), volumenbezogene Wärmekapazität c_p (10^6 J/(m³·K)) und Temperaturleitfähigkeit a (10^{-6} m²/s) im trockenen Zustand (S1), im feuchten Zustand nach Zugabe von 20 ml Wasser (S2) und im vollgesättigten Zustand (S3)).

3.1.15 Verdunstung

Die Messung der Verdunstung wurde im Labor an der für die Prototypen neu entwickelten Messanlage LEMD (Kap. 3.2.12) durchgeführt. Die Lockermaterialien wurden dafür in einen nach unten mit einem Plastikdeckel geschlossenen Stechzylinder mit einem Durchmesser von 10 cm gegeben. Es wurden zwei verschiedene Lockermaterialien der Fugenfüllung (Basaltsplitt und Extensivsubstrat) untersucht. Zum Vergleich wurden des Weiteren mit einem humosen Oberboden (Boden) und einem mit Gras bewachsenen Oberboden (Gras) zwei natürliche Oberflächen mit in die Untersuchung einbezogen.

Der Basaltsplitt zeigt einen Mittelwert der Laborverdunstung von 8,4 g/7,5 h (Median: 8,2 g/7,5 h, Min: 6,7 g/7,5 h, Max: 10,8 g/7,5 h, für neun Messungen). Das Extensivsubstrat zeigt einen Mittelwert von 17,3 g/7,5 h (Median: 17,8 g/7,5 h, Min: 15,7 g/7,5 h, Max: 18,3 g/7,5 h, für fünf Messungen).

Dem gegenüber zeigt der natürliche Boden einen Mittelwert der Laborverdunstung von 14,7 g/7,5 h mit einer Standardabweichung von 1,36 g/7,5 h für neun Messungen und der grasbewachsene Boden einen Mittelwert von 29,50 g/7,5 h mit einer Standardabweichung von 1,2 g/7,5 h für 3 Messungen. Nach drei Durchgängen war das Gras vertrocknet [P10].

3.2 Laborversuche an Pflasterstein-Belägen

Um die Verdunstung gegenüber dem geoSTON® protect zu erhöhen, wurden insgesamt 25 verschiedene Prototypen aus haufwerksporigem Beton mit unterschiedlichen Zusammensetzungen entwickelt (Tabelle 10 und Anhang 2.0) und mit dem handelsüblichen geoSTON® protect, gefügedichten Betonpflastersteinen und weiteren handelsüblichen Sickersteinen verglichen. Die Variationen in der Zusammensetzung beziehen sich bei produktionsbedingt konstant einzustellenden Pflastersteinhöhen auf die Zementart, den Wasserzementwert, das Porenvolumen bezogen auf den Rohgehalt, die Schichtigkeit (Vorsatz- und Kernbeton) sowie die Mächtigkeit der Vorsatzschicht, die Variationen in der Gesteinskörnung (Kornform, Korngröße [minimale Korngröße, maximale Korngröße, Korngrößendifferenz], Kornmaterial) und die Farbe durch unterschiedliche Beimengungen. Außerdem wurden die untersuchten Prototypen im Laufe der Untersuchungen drei Gruppen (Gruppe 1: zweischichtig, Gruppe 2: grobkörnig, Gruppe 3: feinkörnig) zugeordnet.

Bei den Prototypen handelt es sich um gekernte Proben aus 20 x 20 cm großen Pflastersteinen mit Steinstärke 8 cm mit einem Durchmesser von ca. 10 cm. Die genauen Werte für die Abmessungen der einzelnen Steine sind im Anhang 2.1 zu finden.

Für die Herstellung der Prototypen wurden der Portlandzement (Weißzement) CEM I 52,5 (nachfolgend als CEM I bezeichnet) und der Portlandkompositzement (Grauzement) CEM II/B-M(S-LL) 42,4R (nachfolgend als CEM II bezeichnet) verwendet. CEM I besitzt außer Portlandzementklinker keine weiteren Hauptbestandteile und kam bei den Prototypen X und Y zum Einsatz. CEM II/B-M enthält 65-79 % Portlandzementklinker und 21-35 % Hüttensand (S) und auf 0,2 M-% Gesamtkarbonatgehalt begrenzter Kalkstein (LL) sowie 0-5 % Nebenbestandteile; er kam bei allen übrigen Prototypen zum Einsatz. Die Wasserzementwerte (w/z-Wert) der einzelnen Prototypen liegen zwischen 0,21 und 0,53, wobei die meisten Prototypen Wasserzementwerte zwischen 0,31 und 0,35 haben, die einem zähflüssigen Zementleim entsprechen. Der w/z-Wert für den geoSTON® protect liegt bei 0,35 (Tabelle 10).

Tabelle 10: Eigenschaften der 25 Prototypen, dem geoSTON® protect in den Farben grau (Geog) und anthrazit (Geoa) und einem gefügedichteten Pflasterstein, ebenfalls in den Farben grau (Gefdg) und anthrazit (Gefda).

Proto- typ	Zement	w/z- Wert	Poren- volumen vom Rohgehalt (%)	Schichtig- keit		Gesteinskörnung				
				Vor- satz	Kern- beton	Korn- material Vorsatz / Kernbet- ton	Kornform Vorsatz / Kernbeton	Korn- größe Vor- satz/ Kern- beton (mm)	Farbe Vorsatz / Kernbe- ton	Gruppe
A Vorsatz	CEM II	0,32	35,08	einschichtig		Quarz	abgerundet	1/2,2	grau	3
B Kern- beton	CEM II + Flug- asche	0,35	35,88	einschichtig		Rheinsan d + Splitt	gebrochen	0/8	grau	2
C	CEM II + Flug- asche	0,35	34,93	einschichtig		Splitt	plattig gebrochen	2/5	grau	2
D	CEM II + Flug- asche	0,35	36,08	einschichtig		Basalt- splitt	plattig gebrochen	1/3	grau	3
E	CEM II	0,35	34,60	einschichtig		Quarzkies	gebrochen	1/4	grau	3
Ff	CEM II	0,35	35,88	einschichtig		Rheinsan d + Splitt	gebrochen	0/8	grau	2
Fr	CEM II	0,35	35,88	einschichtig		HKS	gebrochen	0/8	anthrazit 6 %	2
G	CEM II	0,29	34,60	einschichtig		HKS	plattig gebrochen	1/4	anthrazit 2 %	3
H	CEM II	0,29	35,08	einschichtig		HKS	abgerundet	1/2,2	anthrazit 5,5%	3
I	CEM II	0,29	35,08	einschichtig		HKS	abgerundet	1/2,2	anthrazit 7 %	3
J	CEM II	0,21	35,08	einschichtig		Quarzkies	gebrochen	2/2,3	grau	3
K green- STON ® Kern- beton als Ganz- stein	CEM II + Flug- asche	0,21	35,08	einschichtig		HKS	gebrochen	0/5	grau	2
M green- STON combi®	CEM II	0,35	35,08	5 mm dicht	offen	Rheinsan d + Granit	abgerundet	0/3	grau	1
						Rheinsan d + Splitt	gebrochen	0/5	grau	
N green- STON combi®	CEM II	0,35	35,08	5 mm dicht	offen	Rheinsan d + Granit	abgerundet	0/3	anthrazit	1
						Rheinsan d + Splitt	gebrochen	0/5	grau	
O	CEM II	0,38	34,93	einschichtig		HKS	plattig gebrochen	0/5	grau	2
R	CEM II	0,30	36,60	einschichtig		Glas- kugeln	rund	2	grau	3
S	CEM II	0,29	36,10	einschichtig		Glas- kugeln	rund	3	grau	3
T	CEM II	0,31	35,08	20 mm offen	offen	Quarz	abgerundet	1/2,2	grau	1
						HKS	gebrochen	2/5	grau	
T m Werk- produk- tion	CEM II	0,31	35,08	20 mm offen	offen	Quarz	abgerundet	1/2,2	anthrazit	1
						HKS	gebrochen	2/5	grau	
U	CEM II	0,31	35,08	40	offen	Quarz	abgerundet	1/2,2	grau	1

Proto- typ	Zement	w/z- Wert	Poren- volumen vom Rohgehalt (%)	Schichtig- keit		Gesteinskörnung				
				Vor- satz	Kern- beton	Korn- material Vorsatz / Kernbe- ton	Kornform Vorsatz / Kernbeton	Korn- größe Vor- satz/ Kern- beton (mm)	Farbe Vorsatz / Kernbe- ton	Gruppe
V	CEM II	0,33	35,08	10 mm offen	dicht	Quarz	abgerundet	1/2,2	grau	1
						HKS	gebrochen	0/5	grau	
W	CEM II	0,53	41,80	einschichtig		Bläh- schiefer	plattig gebrochen	1/1,6	anthrazit 5 %	3
X	CEM I + Flug- asche	0,33	35,08	einschichtig		HKS	abgerundet	1/2,2	anthrazit 5%	3
Y	CEM I	0,41	35,08	einschichtig		HKS	abgerundet	1/2,2	anthrazit 5 %	3
Z	CEM II	0,31	35,08	10 mm offen	offen	Quarz	abgerundet	1/2,2	grau	1
						HKS	gebrochen	2/5	grau	
AA	CEM II	0,31	35,08	40 mm offen	dicht	Quarz	abgerundet	1/2,2	grau	1
						Rheinsan d + Splitt + RC	gebrochen	0/16	grau	
Gefdg	CEM II	0,31	35,08	5 mm dicht	dicht	Rheinsan d + Basalt	abgerundet + gebrochen	0/3	grau	1
						HKS	gebrochen	0/5	grau	
Gefda	CEM II	0,31	35,08	5 mm dicht	dicht	Rheinsan d + Basalt	abgerundet + gebrochen	0/3	anthrazit	1
						HKS	gebrochen	0/5	grau	
Geog geo STON protect®	CEM II	0,35	35,08	5 mm offen	offen	Quarz	abgerundet	1/2,2	grau	1
						HKS	gebrochen	0/8	grau	
Geoa geo STON protect®	CEM II	0,35	35,08	5 mm offen	offen	Quarz	abgerundet	1/2,2	anthrazit	1
						HKS	gebrochen	0/8	grau	

Für die Berechnung der Rezepturen wird das Porenvolumen vom Rohgehalt (in %) benötigt. Dies wird ermittelt, indem in einem 8 Liter-Topf das Rohmaterial verdichtet und das Porenvolumen über das Volumen an zugeführtem Wasser ermittelt wird.

Die Korngröße der Gesteinskörnung an der Steinoberfläche beeinflusst unmittelbar die Höhe der Benetzungs- und Muldenverluste und damit die Verdunstungshöhe. Je feiner desto größer die Oberfläche, desto geringer die Muldentiefe.

Als Kornmaterial für die Gesteinskörnung wurde unregelmäßig gebrochener Hartkalkstein (HKS) verwendet, bei dem die Korngröße nicht homogen, sondern über einen bestimmten Korngrößenbereich verteilt ist. Die eingesetzten runden und gewaschenen Quarzkörnungen weisen einen engen Korngrößenbereich auf. Für zwei Prototypen wurden Glaskügelchen (Prototypen R und S) und für einen Blähschiefer (Prototyp W) verwendet, um mögliche Auswirkungen des verwendeten Materials auf die ermittelten Kenngrößen (insbesondere die Dichte und die Temperaturleitfähigkeit) und vor allem auf die Verdunstungsrate zu testen (Abbildung 11). Letztendlich ist die Gesteinskörnung vom Zement vollständig umschlossen. Die Glaskügelchen, die für die Prototypen R und S verwendet wurden, sind genau gleich groß und gleichmäßig gerundet. Der für den Prototyp W verwendete Blähschiefer hat eine

plattige Kornform und eine relativ homogene Korngröße. Die Kornform kann einen Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit und das Wasserhaltevermögen haben.



Abbildung 11: Haufwerksporige Betonpflastersteine mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen. Links: Prototyp K (Hartkalkstein); Mitte: Prototyp S (Glas); rechts: Prototyp W (Blähschiefer) [R11].

Die verschiedenen Prototypen wurden zum Teil einschichtig und zum Teil zweischichtig hergestellt (wobei bei den zweischichtigen Prototypen zusätzlich in der Mächtigkeit der Vorsatzschicht variiert wurde [Abbildung 12]), um den Einfluss auf die Verdunstung zu ermitteln. Während die Vorsatzschichten des geoSTON® protect (Prototyp Geog), des gefügedichten Pflastersteines (Prototyp Gefdg) und der Prototypen M und N eine Mächtigkeit von 5 mm haben, sind die Vorsatzschichten der Prototypen U und AA 40 mm mächtig. Die Prototypen V und Z haben eine 10 mm starke und der Prototyp T eine 20 mm starke Vorsatzschicht (Tabelle 10) [R11].



Abbildung 12: Haufwerksporige Betonpflastersteine mit unterschiedlich starker Vorsatzschicht. Links oben: Prototyp O (einschichtig); rechts oben: Prototyp Z (1 cm mächtige Vorsatzschicht); links unten: Prototyp T (2 cm mächtige Vorsatzschicht); rechts unten: Prototyp U (4 cm mächtige Vorsatzschicht) [R11].

Auch in der Farbe der Prototypen wurde variiert. Durch Beimengen von Farbpigmenten (Eisen(II,III)oxid (Fe_3O_4)) zu dem haufwerksporigen Beton wurden Anthrazitfärbungen erzeugt, die durch unterschiedliche Mengenanteile in ihrer Intensität schwanken (Tabelle 10). Die dunkelste Färbung hat der Prototyp I mit einem Anthrazitanteil von 7 %, während der Prototyp G mit einem Anthrazitanteil von nur 2 % die geringste Färbung hat (Abbildung 7) [R11].



Abbildung 13: Eingefärbte haufwerkporige Betonpflastersteine; links: Prototyp G (anthrazit 2 %); rechts: Prototyp I (anthrazit 7 %) [R11].

Bei den zum Vergleich in die Untersuchungen hinzugefügten, gefügedichten Betonpflastersteinen sind die Hohlräume zwischen den Gesteinskörnungen mit Zementleim gefüllt, so dass kein signifikanter Anteil von eingeschlossener Luft oder Hohlräumen enthalten ist. Wie der geoSTON[®] protect (Prototyp Geog) haben auch die gefügedichten Pflastersteine (Prototyp Gefda) einen zweiseichtigen Aufbau. Sie bestehen aus einem ca. 7,5 cm starken, dichten Kernbeton und einer ca. 0,5 cm starken, ebenfalls gefügedichten Vorsatzschicht (Abbildung 14) [R11].



Abbildung 14: Gefügedichte Betonpflastersteine. Links: anthrazitfarbener, gefügedichteter Betonpflasterstein (Prototyp Gefda); rechts: grauer, gefügedichteter Betonpflasterstein (Prototyp Gefdg) [R11].

Im Rahmen des Vorhabens wurden weitere urbane Flächenbeläge hinsichtlich der Verdunstung im Labor (Kap. 3.2.12) untersucht. Zu den weiteren Straßendecken wurde ein 30 cm mächtiger Bohrkern eines wasserundurchlässigen Straßenasphalts (Asph), welcher vierschichtig (Asphaltdeckschicht, Membranschicht, Bindschicht,

Tragschicht) aufgebaut ist, und ein 8,6 cm mächtiger Bohrkern eines undurchlässigen Straßenbetons (Bnrw) verwendet. Zwei weitere handelsübliche wasserdurchlässige Pflastersteine (An und KP) aus dem Baumarkt wurden verwendet. Die Probe An ist 6 cm stark und besitzt einen 10 mm starken Vorsatz aus Naturstein. Die anthrazitfarbene Probe KP ist 8 cm stark und besitzt einen 10 mm starken Vorsatz aus bis zu 4 mm großen Körnern und einen grobkörnigen Kern mit bis zu 10 mm großen Körnern (vergleichbar mit Prototyp T). Zum Vergleich wurde des Weiteren eine graue wasserundurchlässige Betonplatte (WB) untersucht; die Betonplatte ist zweischichtig aufgebaut mit einem 10 mm starken gering porigen Vorsatz und einem geschlossenen Kernbeton (vergleichbar mit Gefdg).

3.2.1 Festigkeit

Die Festigkeitsprüfungen an den Prototypen wurden in Abhängigkeit der maßgeblichen Prüfnormen bis zum Bruch der Proben auf:

- Spaltzugfestigkeit (Belastung durch mittiges Aufbringen einer Linienlast von unten und oben)
- Druckfestigkeit (Belastung durch Aufbringen einer Flächenlast von unten und oben)
- Biegezugfestigkeit (Belastung auf Biegung durch mittiges Aufbringen einer Linienlast von oben)

3.2.1.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wird gemäß BDB-Rili-WD im Labor von HKB an haufwerksporigen Pflastersteinen bestimmt. Die Druckfestigkeit, ermittelt an fünf Pflastersteinen, muss im Mittel mindestens 40 N/mm² betragen; kein Einzelwert darf unter 35 N/mm² liegen [BDB96]. An zwei Pflastersteintypen (geoSTON[®] protect anthrazit [Geoa] und geoSTON[®] protect grau [Geog], 20/10/8) wurde die Druckfestigkeit mit Fünffachbestimmung überprüft. Dafür wurden aus der Produktion vom 6.6.2008 nach 286 Tagen zwei direkt übereinander liegende Lagen beprobt, indem acht diagonal über das Brett verteilte Steine gemäß Entnahmeplan 20/10/8 entnommen wurden (Probe 1-8). Die Steine wurden beidseitig geschliffen und ohne Wasserlagerung geprüft. Bei geoSTON[®] protect anthrazit liegen die fünf Einzelwerte zwischen 46,7 N/mm² und 54,5 N/mm² (Mittelwert 49,8 N/mm²); die Anforderungen sind damit erfüllt. Bei geoSTON[®] protect grau liegen die fünf Einzelwerte zwischen 42,4 N/mm² und 51,5 N/mm² (47,1 N/mm²); die Anforderungen sind damit ebenfalls erfüllt. Die Korndichten lagen zwischen 2,11 g/cm³ und 2,14 g/cm³. Die Ergebnisse gehen nicht in die statistische Auswertung ein.

Die Druckfestigkeit der in Phase 02 eingebauten geoSTON protect-Pflastersteine in der Abmessung 20/10/8 cm, Farbe Anthrazit wiesen Einzelwerte zwischen 42,4 N/mm² und 48,4 N/mm² auf. Der Mittelwert betrug 45,5 N/mm². Die Anforderungen sind damit erfüllt.

3.2.1.2 Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wird nach DIN EN 1338 im Labor von HKB an gefügedichten Pflastersteinen bestimmt. Jeder Einzelwert muss den Sollwert von 3,6 N/mm² nach DIN EN 1338 überschreiten. An dem gefügedichten Rechteckpflaster (20/10/8) wurde die Spaltzugfestigkeit mit Fünffachbestimmung überprüft. Dafür wurden aus der Produktion vom 6.6.2008 nach 286 Tagen zwei direkt übereinander liegende Lagen beprobt, indem acht diagonal über das Brett verteilte Steine gemäß Entnahmeplan 20/10/8 entnommen wurden (Probe 1-8, Anhang 2.2). Die Steine wurden beidseitig geschliffen und ohne Wasserlagerung geprüft. Die fünf Einzelwerte liegen zwischen 4,1 N/mm² und 5,1 N/mm²; die Anforderungen sind damit erfüllt. Die Korndichten lagen dabei zwischen 2,13 g/cm³ und 2,20 g/cm³. Diese Ergebnisse gehen nicht in die statistische Auswertung ein.

Die Spaltzugfestigkeit der in Phase 02 eingebauten drainSTON-Pflastersteine in der Abmessung 21/14/8 cm, Farbe Anthrazit wiesen Einzelwerte zwischen 6,1 N/mm² und 6,8 N/mm² auf. Der Mittelwert betrug 6,4 N/mm². Die Anforderungen sind damit erfüllt.

Die Spaltzugfestigkeit der in Phase 02 eingebauten greenSTON combi-Vollsteine in der Abmessung 20/20/8 cm, Farbe Anthrazit wiesen Einzelwerte zwischen 4,1 N/mm² und 5,7 N/mm² auf. Der Mittelwert betrug 4,9 N/mm². Die Anforderungen sind damit erfüllt.

3.2.1.3 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit wird in Anlehnung an die DIN EN 1339 im Labor an fünf Pflastersteinen bestimmt. Jeder Einzelwert muss den Sollwert von 2,8 N/mm² nach DIN EN 1339 überschreiten. An dem porösen greenSTON[®] (25/25/8, Rasengitterstein) aus Geländeversuch I wurde die Biegefestigkeit mit Fünffachbestimmung überprüft. Die fünf Einzelwerte liegen zwischen 5,3 N/mm² und 6,5 N/mm²; die Anforderungen sind damit erfüllt. Der Mittelwert beträgt 5,8 N/mm². Die Ergebnisse gehen nicht in die statistische Auswertung ein.

3.2.2 Porenanteil, Porenzahl, Korndichte, Trockendichte

Aufgrund ihrer Kornstruktur besitzen die Proben immer ein bestimmtes Porenvolumen V_{Poren} , das je nachdem, ob es auf das Gesamtvolumen V_{Probe} oder auf die porenfreie Festmasse V_{Fe} der Probe bezogen wird, als Porenanteil n oder Porenzahl e bezeichnet wird [PS06].

Der Porenanteil n ist nach DIN 4049-3 als der Quotient aus dem Porenvolumen V_{Poren} (in cm³) und dem gesamten Probenvolumen V_{Probe} (in cm³) definiert.

$$n = \frac{V_{\text{Poren}}}{V_{\text{Probe}}} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad \text{Gl. 10}$$

Die Porenzahl e ist das Verhältnis des Porenvolumens V_{Poren} (cm³) zum Feststoffvolumen V_{Fe} (cm³) der Probe [S94].

$$n = \frac{V_{\text{Poren}}}{V_{\text{Fe}}} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad \text{Gl. 11}$$

Zwischen Porenanteil n und Porenzahl e besteht folgender Zusammenhang [S94]:

$$n = \frac{e}{1+e} \quad \text{Gl. 12} \quad \text{und} \quad e = \frac{n}{1-n} \quad \text{Gl. 13}$$

Um Porenanteil und Porenzahl berechnen zu können, müssen zunächst die Trockendichte ρ_d (g/cm³) und die Korndichte ρ_s (g/cm³) der einzelnen Proben bestimmt werden. Dabei ist die Trockendichte ρ_d der Quotient aus der Trockenmasse m_d (g) nach Trocknung der Probe bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz und dem Volumen V_{Probe} (cm³) der Probe [S94].

$$\rho_d = \frac{m_d}{V_{\text{Probe}}} \quad \text{Gl. 14}$$

Die Korndichte ρ_s ist nach DIN 18124 die Rohdichte der festen Einzelbestandteile des Bodens und errechnet sich aus der Trockenmasse m_d (g) und dem Feststoffvolumen V_{Fe} (cm³) [S94].

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_{\text{Fe}}} \quad \text{Gl. 15}$$

Die Trockenmasse m_d wird durch Wägung auf 0,01 g genau bestimmt. Das Feststoffvolumen V_{Fe} entspricht dem Verdrängungsvolumen V_{Verd} , also dem Volumen des Wassers, das durch die Probe verdrängt wird.

Um das Verdrängungsvolumen der Proben bestimmen zu können, wurde eine eigene Methode im Labor entwickelt [R11]. Fünf Eimer mit einem Fassungsvermögen von jeweils 10 Litern wurden etwa auf halber Höhe mit einem Loch versehen, durch das ein Kunststoffschlauch geschoben wurde, durch den das verdrängte Wasser aus dem Eimer heraus laufen kann (Abbildung 15). Die Eimer werden auf einen Tisch gestellt, so dass etwas unterhalb der Eimer jeweils ein Messzylinder mit einem Fassungsvermögen von 1000 ml platziert werden kann, in den der Ausflussschlauch des Eimers hereinragt, so dass das verdrängte Wasser im Messzylinder aufgefangen wird. Es ist darauf zu achten, dass das Wasser ungehindert in den Messzylinder fließen kann und die Verbindung zwischen Eimer und Schlauch gut abgedichtet ist, so dass das verdrängte Wasser komplett in die Messung einbezogen wird und kein Wasser verloren geht. Vor Versuchsbeginn wird der Eimer soweit mit destilliertem Wasser gefüllt, dass schon einige Tropfen aus dem Schlauch heraus laufen. Erst wenn kein Wasser mehr durch den Überlauf herauströpft, ist gewährleistet, dass der Wasserspiegel im Eimer genau auf der Höhe der Schlauchunterkante liegt (Abbildung 15). Nun kann der Messzylinder unter dem Eimer positioniert und die zuvor bei 105 °C getrocknete Probe in den Eimer gestellt werden. Das durch die Probe verdrängte Wasser wird im Messzylinder aufgefangen. Da es sich um haufwerksporige Proben handelt, verbleiben die Proben für 24 h im Wasser, damit sich die Poren vollständig mit Wasser füllen. Nach Ablauf der 24 h wird das im Messzylinder aufgefangene Wasser wieder in den Eimer gegeben und das verdrängte Was-

servolumen erneut aufgefangen. Da die Poren der Probe zu dem Zeitpunkt bereits gefüllt sind, entspricht das verdrängte Wasservolumen nun dem Volumen des Feststoffanteils V_{Fe} [R11].

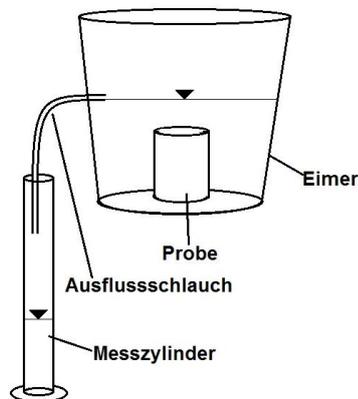


Abbildung 15: Schematischer Versuchsaufbau zur Ermittlung des Verdrängungsvolumens [R11].

Nach Ermittlung der Trockenmasse und dem Kornvolumen kann die Korndichte ρ_s berechnet werden.

Die Ergebnisse der Messungen des Porenanteils n und der Porenzahl e zeigen (Anhang 2.3), dass die Werte für die Porenzahl e immer höher sind, als die Werte für den Porenanteil n (Abbildung 16). Die Standardabweichungen sind für beide Größen relativ groß, jedoch liegen die Standardabweichungen für die Porenzahl e noch über denen des Porenanteils n . Die höheren Werte der Porenzahl e lassen sich dadurch erklären, dass das Porenvolumen hier nur auf die porenfreie Festmasse bezogen wird, während bei der Ermittlung des Porenanteils das Porenvolumen auf das Gesamtvolumen des Pflastersteins bezogen wird. Daher wird der Porenanteil n auch als Porenvolumen V_{Poren} bezeichnet. Das größte Porenvolumen zeigt der Prototyp W, der aus plattigem Basalt besteht. Das geringste Porenvolumen haben die gefügedichten Pflastersteine Gefdg und Gefda, sowie der Prototyp N [R11].

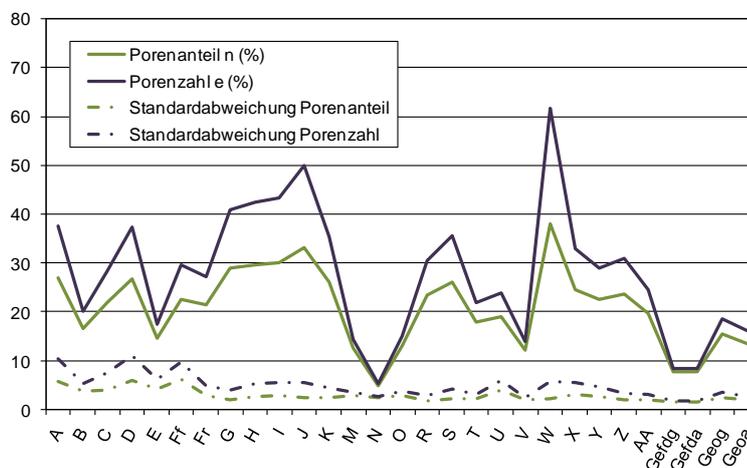


Abbildung 16: Vergleich der Werte für den Porenanteil n und die Porenzahl e [R11].

Da das Porenvolumen ebenfalls über das Verdrängungsvolumen bestimmt wird, sind auch hier Fehler durch ein unterschiedliches Verhalten in der Bestimmung des Verdrängungsvolumens möglich.

Abbildung 17 zeigt, dass die Verdunstungsrate der einzelnen Betonpflastersteine nicht von deren Porenvolumen abzuhängen scheint. Es ist keine deutliche Zu- oder Abnahme der Verdunstungsrate mit höherem Porenvolumen zu erkennen.

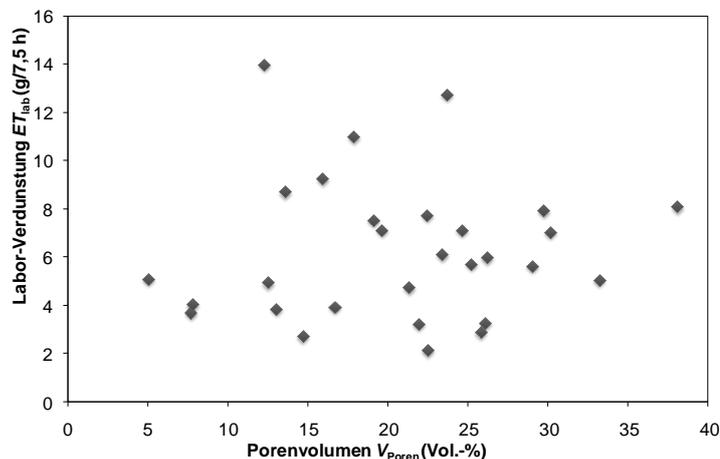


Abbildung 17: Abhängigkeit der im Labor ermittelten Verdunstungsraten ET_{lab} vom Porenvolumen V_{Poren} .

3.2.3 Porensystem

Für die Beschreibung des Porensystems – insbesondere der Durchgängigkeit der Poren – wurden microcomputertomographische Untersuchungen und Untersuchungen an Schliffrn mittels Digitalmikroskop durchgeführt.

3.2.3.1 Microcomputertomographische Untersuchung

Die Proben wurden mit dem Computertomograph MicroCT (μ CT 100) der SCANCO Medical AG in Brüttisellen (Schweiz) gemessen. Das MicroCT arbeitet mit einer Röntgenröhre mit 5 μ m Kathodenbrennfleck (Spannung 90 kVp, Stromstärke 200 μ A, Integrationszeit 1,08 s), die einen Strahlenkegel erzeugt (Anhang 2.4.1). Mit einer CCD-Kamera werden die Photonen detektiert und die gewonnenen Daten auf einer Computer-rekonstruierten Bildmatrix mit 1536 x 1536 x 1177 Pixeln projiziert. Für die Messungen der Betonpflasterstein-Kerne wurde eine Voxel-Größe von 68.4 μ m in allen drei räumlichen Dimensionen gewählt. So wurden bei einer Höhe der Pflastersteine von 80.5 mm 1177 Schnitte gescannt (Abbildung 18). Die einzelnen Phasen (Pore, Beton, Gesteinskörnung) konnten aufgrund der Graustufen automatisch segmentiert, als 3D-Modell visualisiert (Anhang 2.4.2 bis Anhang 2.4.6) und das Porenvolumen aus Gesamtvolumen und Gesteinsvolumen berechnet werden (Abbildung 19).

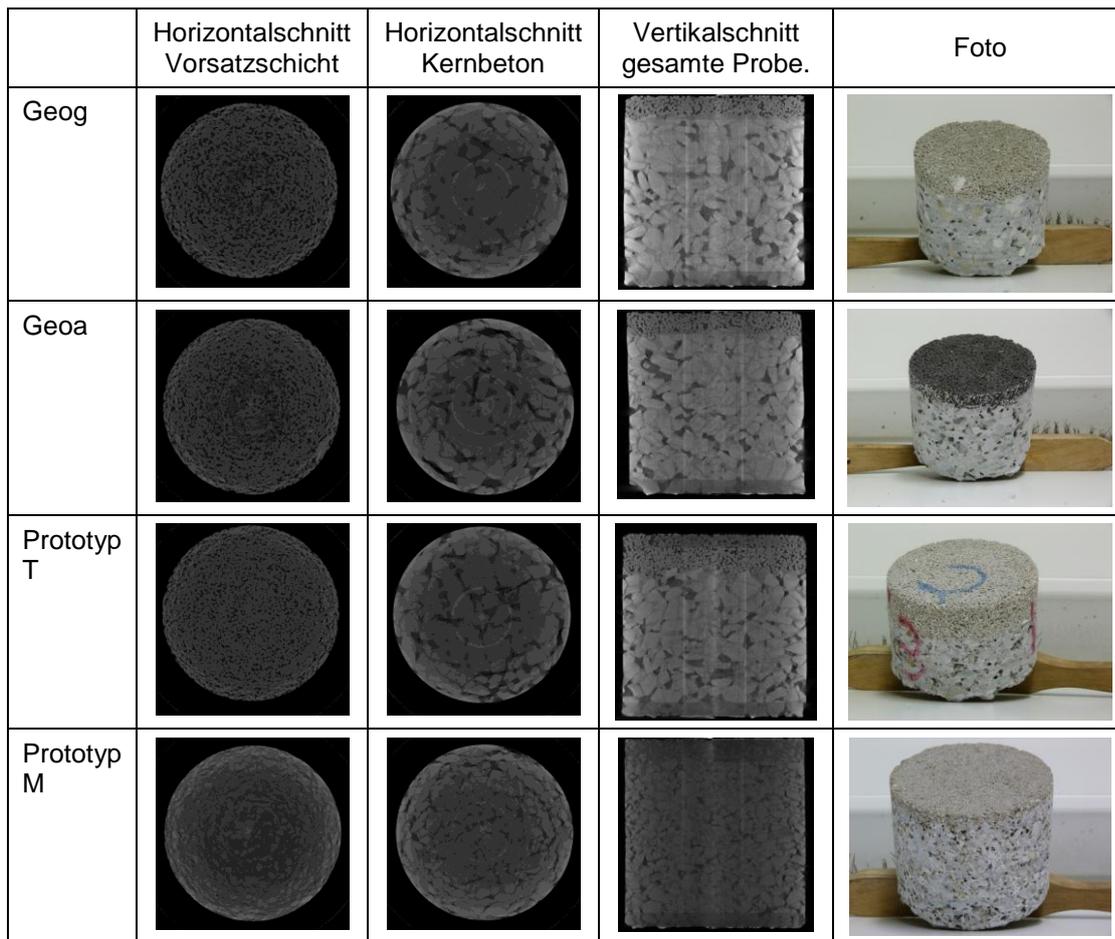


Abbildung 18: Graustufen-Bilder der microCT-Messungen.

Insgesamt wurden vier Pflastersteinkerne mit einem Durchmesser von ca. 7,5 cm und einer Probenlänge von ca. 8 cm mit dem MicoCT gemessen. In die engere Auswahl kamen als Referenzsteine der geoSTON® protect grau (Geog) und in Anthrazit (Geoa) sowie die auf der Labormaschine hergestellten Prototyp T (zum Zeitpunkt der Entscheidung der Prototyp mit der höchsten Laborverdunstung) und Prototyp M (Vorsatz gefügedicht und Kernbeton haufwerksporig) (Abbildung 18).

Die einzelnen Phasen (Pore, Beton, Gesteinskörnung) konnten aufgrund der Graustufen sehr gut voneinander getrennt dargestellt werden. Die Pore erscheint in einem Schwarz bis dunkelgrau, der Beton in mittelgrau und die Gesteinskörnung in hellgrau. Das Porenvolumen ist in der Vorsatzschicht höher als im Kernbeton.

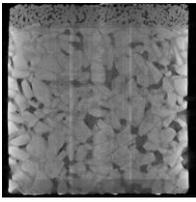
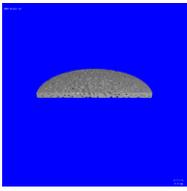
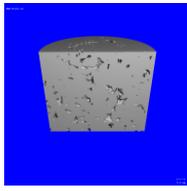
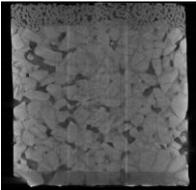
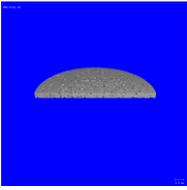
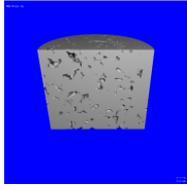
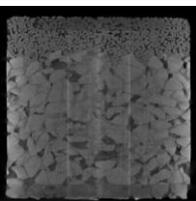
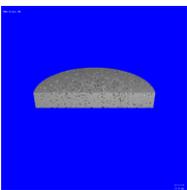
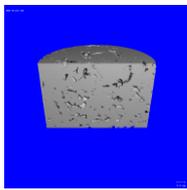
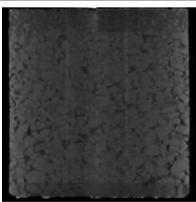
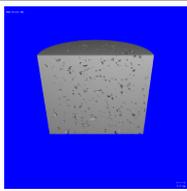
	Vertikalschnitt gesamte Probe	Modell Vertikalschnitt Vorsatzschicht	Modell Vertikalschnitt Kernbeton	Porenvolumen Vorsatzschicht (%)	Porenvolumen Kernbeton (%)
Geog				23,2	10,0
Geoa				20,6	11,8
Prototyp T				13,6	12,1
Prototyp M		n.b.		n.b.	6,7

Abbildung 19: 3D-Modelle der Vorsatzschicht und des Kernbetons mit dazugehörigem Porenvolumen.

Tabelle 11: Tabellarische Darstellung der Ergebnisse der Untersuchung der Durchgängigkeit an vier ausgewählten Kernen.

Geog			
dicht	dicht	2	dicht
1	dicht	dicht	dicht
dicht	1	dicht	1
dicht	dicht	dicht	dicht

Geoa			
dicht	1	dicht	dicht
dicht	dicht	dicht	1
dicht	1	dicht	dicht
dicht	dicht	dicht	dicht

Prototyp T			
dicht	dicht	dicht	dicht
dicht	dicht	dicht	dicht
dicht	2	dicht	dicht
dicht	dicht	dicht	dicht

Prototyp M			
dicht	dicht	dicht	dicht
dicht	dicht	dicht	dicht
dicht	dicht	dicht	dicht
dicht	dicht	dicht	dicht

Für die visuelle Auswertung der Porendurchgängigkeit wurde aus den insgesamt für eine Probe aufgenommenen 1177 Schnittbildern ein Video erstellt, in dem die Bilder nacheinander im 0,02 Sekunden Takt abgespielt werden. Über das Video wurde dann ein Raster aus 16 Quadraten gelegt, um zu schauen, wie viele Poren in einem Quadrat von der Oberseite bis zur Unterseite des Pflastersteins durchgehen (Tabelle

11). Bei den Referenzsteinen Geog und Geoa ist eine gute Durchgängigkeit der Poren gegeben; der Prototyp T zeigt nur in zwei Poren eine Durchgängigkeit durch den gesamten Bohrkern. Der Prototyp M zeigt aufgrund seiner gefügedichten Vorsatzschicht keine Porendurchgängigkeit.

3.2.3.2 Schliffuntersuchung mittels Digitalmikroskop

Für die Auswertung mit dem Keyence Digitalmikroskop des Instituts für Physik an der Universität Münster wurden von dem Prototypen Geog insgesamt drei Schliffe angefertigt. Ein Schliff der Vorsatzschicht, ein Schliff aus dem Übergangsbereich zwischen Vorsatzschicht und Kernbeton und ein Schliff des Kernbetons.

Da die Schliffe mit Harz getränkt werden mussten, damit sie stabil sind, ist vor allem bei den feinkörnigeren Schliffen der Vorsatzschicht und dem Übergangsbereich unter dem Mikroskop nur noch schwer zu erkennen, bei welchen Bereichen es sich um Poren und bei welchen Bereichen es sich um Gesteinskörnung bzw. Beton handelt (Abbildung 20).

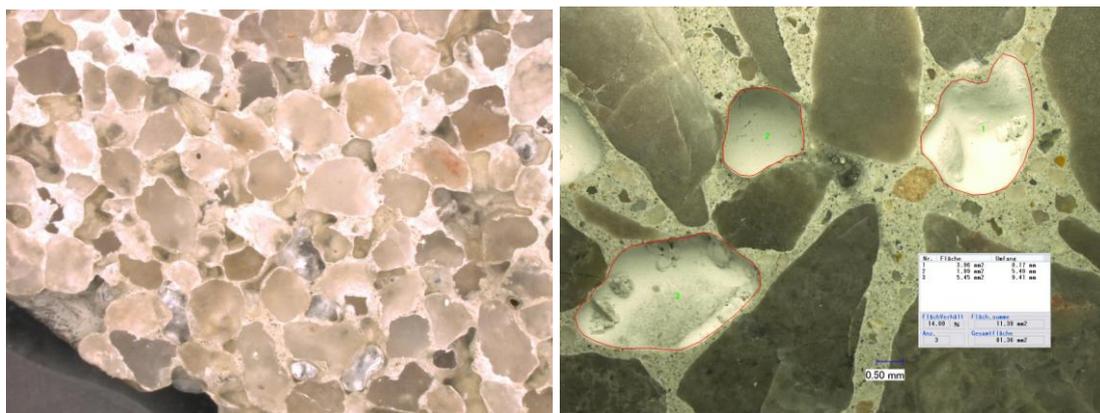


Abbildung 20: Schliffaufnahme der Vorsatzschicht von geoSTON® protect grau (Geog) (links) und des Kernbetons (rechts) unter dem Digitalmikroskop

Für den Schliff aus dem Kernbeton wurden mit einer Bearbeitungs-Software des Digitalmikroskops die Flächen der einzelnen Poren durch manuelle Polygonzüge vermessen. Die Gesamtfläche der Poren beträgt für diesen Schliff 5,99 cm², während die Gesamtfläche des Schliffes 44,18 cm² beträgt. Die Fläche der Poren beträgt also 13,56 % von der Gesamtfläche.

Für die Schliffe der Vorsatzschicht und des Übergangsbereiches wurden die einzelnen Poren nicht vermessen, da diese zu klein und zahlreich waren und der Kontrast zu gering ist, um diese digital vermessen zu können.

Die Zuordnung des entsprechenden CT-Bildes zu dem Schliff des Kernbetons ist nicht genau möglich, da die Schliffe leicht schief aus der Probe herausgeschnitten wurden, so dass immer nur ein Bereich des Schliffes mit einem CT-Bild übereinstimmt. Die Zuordnung der entsprechenden CT-Bilder zu den Schliffen der Vorsatzschicht und des Übergangsbereiches waren nicht möglich.

Beim Vergleich des Schliffes des Kernbetons mit den CT-Bildern ist zu erkennen, dass die CT-Bilder anhand der verschiedenen Graustufen sehr gut wiedergeben, bei welchen Bereichen es sich um Pore, Gesteinskörnung oder Beton handelt. Die sehr dunklen Bereiche stellen Poren dar, während der hellste Grauton die Gesteinskörnung wiedergibt (Abbildung 21).

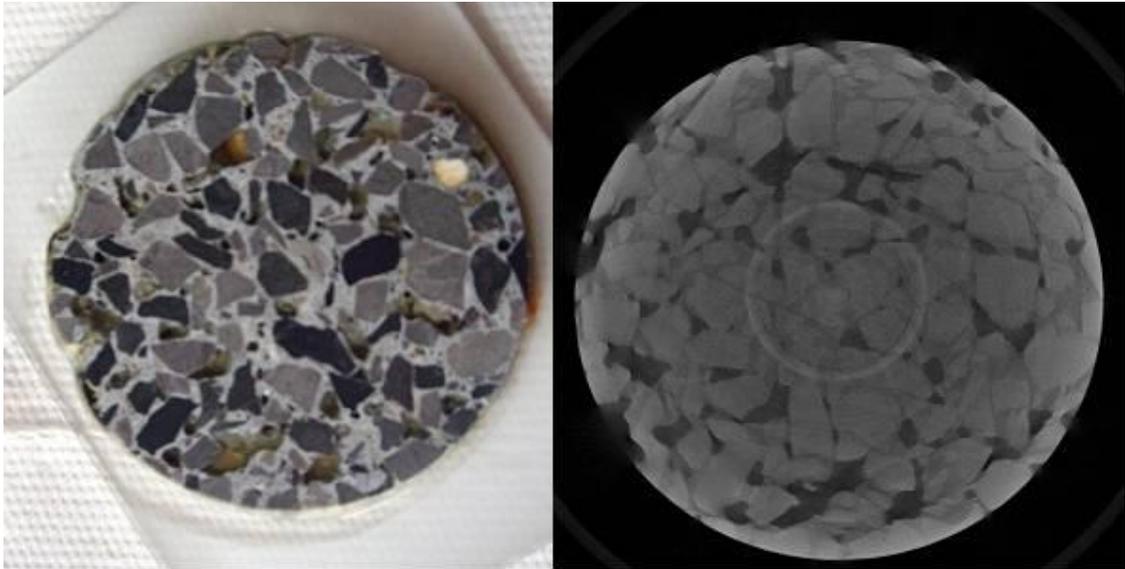


Abbildung 21: Vergleich des Schliffes aus dem Kernbeton (links) mit dem dazugehörigen microCT-Bild (rechts).

3.2.4 Maximale Rauigkeit

Die maximale Rauigkeit R_{\max} beschreibt die Höhendifferenz zwischen dem jeweils höchsten und dem tiefsten Punkt an der Oberfläche eines Steines. Um die maximale Rauigkeit der einzelnen Prototypen zu bestimmen, wurde eine eigene Konstruktion entwickelt, mit der sich der höchste und der tiefste Punkt an der Oberfläche eines Steines ermitteln lassen. Die Differenz zwischen diesen beiden Punkten ergibt dann die maximale Rauigkeit R_{\max} [GV83].

Um die Oberfläche der Pflastersteine möglichst gleichmäßig vermessen zu können, wurde ein Netz aus Bindfäden über den Stein gespannt, so dass sich insgesamt 25 Quadrate mit einer Fläche von je 1 cm² ergaben (Abbildung 22). Mit einem analogen Wegaufnehmer wurden dann jeweils der höchste und der tiefste Punkt in einem Quadrat bestimmt. Da die maximale Rauigkeit R_{\max} der Differenz des jeweils höchsten und tiefsten Punktes auf der gesamten Oberfläche entspricht, wurde sie nicht über Mittelwertbildung der Rauigkeiten für die einzelnen Quadrate bestimmt, sondern aus der Differenz des höchsten und des tiefsten Punktes der gesamten Oberfläche [R11].

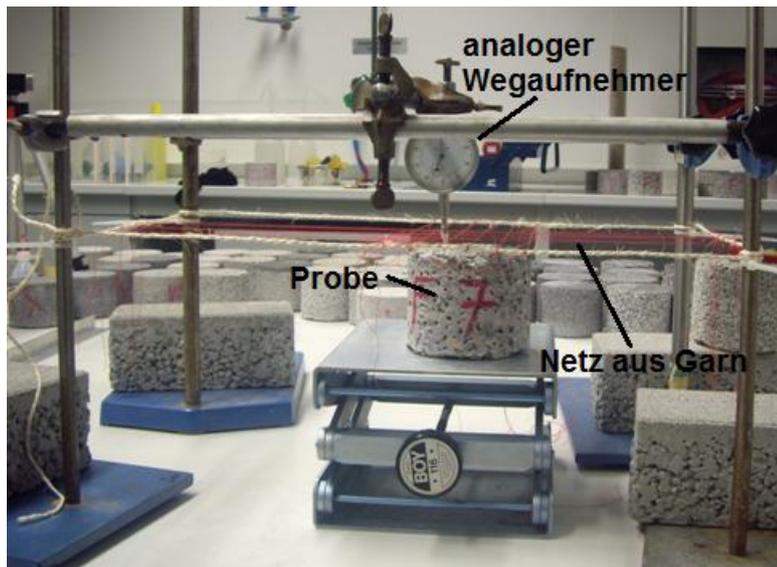


Abbildung 22: Versuchsaufbau für die Messung der maximalen Rauigkeit [R11].

Die Ergebnisse der Messung der maximalen Rauigkeit (Anhang 2.5) zeigen eine gewisse Abhängigkeit von der Korngröße der verwendeten Gesteinskörnung (Abbildung 23). Die Prototypen mit den maximalen Gesteinskörnungen zwischen $R_{\max} = 1,6 \text{ mm}$ und $R_{\max} = 2,2 \text{ mm}$ zeigen maximale Rauigkeiten zwischen 2 und 4 mm mit geringen Standardabweichungen. Mit größer werdenden maximalen Korngrößen einer Gesteinskörnung nehmen die maximalen Rauigkeiten und ebenso die Standardabweichungen zu. Die Prototypen mit den höheren maximalen Korngrößen der Gesteinskörnungen von 8 mm (Prototypen B, Ff und Fr) zeigen daher auch die höchsten maximalen Rauigkeiten zwischen $R_{\max} = 11 \text{ mm}$ und $R_{\max} = 13 \text{ mm}$ mit Standardabweichungen von $\sigma = 1,73$ (Ff) und $\sigma = 1,56$ (Fr).

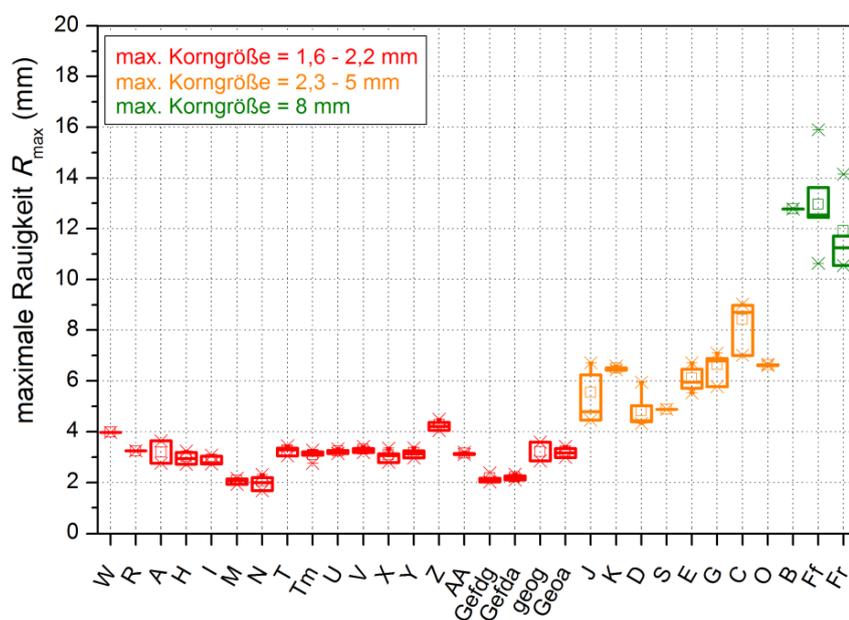


Abbildung 23: Abhängigkeit der maximalen Rauigkeit R_{\max} von der maximalen Korngröße [R11].

Abbildung 24 zeigt, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Labor-Verdunstungsraten (Kap. 84) und der maximalen Rauigkeit besteht. Jedoch haben die Prototypen, die höhere Verdunstungsraten zeigen, eher geringe maximale Rauigkeiten zwischen 2 mm und 4 mm. Dies könnte jedoch auch auf die Zweischichtigkeit der Pflastersteine zurückgeführt werden, da die Prototypen mit Verdunstungsraten über 10 g/7,5 h (Prototypen T, V und Z) die gleiche Vorsatzschicht haben, so dass die Werte für die maximale Rauigkeit nur gering voneinander abweichen.

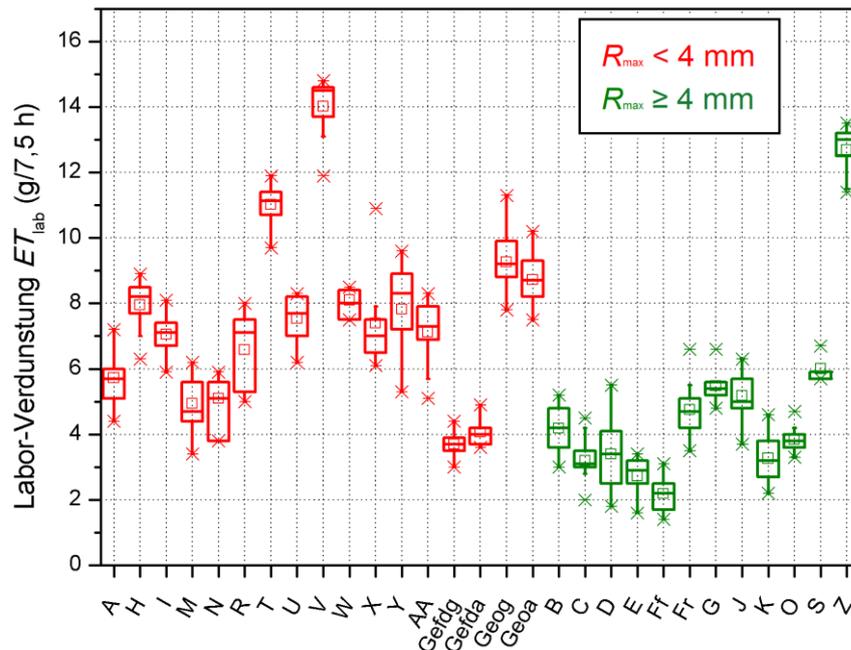


Abbildung 24: Abhängigkeit der Labor-Verdunstungsraten ET_{lab} von der maximalen Rauigkeit R_{max} .

3.2.5 Benetzbarkeit

Als Benetzungswinkel wird der Winkel bezeichnet, der sich aufgrund der Grenzflächenspannung zwischen der Oberfläche eines Festkörpers und einer im Dreiphasenpunkt an den Flüssigkeitstropfen angelegten Tangente einstellt (Abbildung 25). Er ist ein Maß für die Benetzbarkeit einer Festkörperoberfläche durch eine Flüssigkeit [D02].

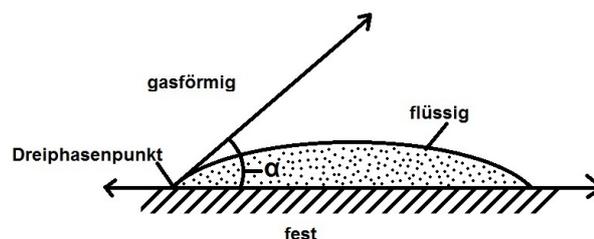


Abbildung 25: Benetzbarkeit eines Flüssigkeitstropfens auf einer festen Oberfläche. Durch Anlegen einer Tangente im Dreiphasenpunkt an den Tropfen kann der Benetzungswinkel α bestimmt werden, nach [D02].

Nach DÖRFLER (2002) wird zwischen folgenden Szenarien unterschieden:

- $\alpha = 0^\circ$ Flüssigkeit spreitet auf der Oberfläche (vollständige Benetzung)
- $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ Flüssigkeit benetzt die Oberfläche, spreitet aber nicht (unvollständige Benetzung)
- $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ keine Spreizung und auch Benetzung folgt nicht, bzw. nur sehr unvollständig
- $\alpha = 180^\circ$ absolute Unbenetzbarkeit

In dem Versuch stellen die einzelnen Prototypen die feste Phase und destilliertes Wasser die flüssige Phase dar. In einem Vorversuch wurden zunächst mit einer kleinen Tropfflasche einzelne Tropfen von destilliertem Wasser auf den Stein gegeben und deren Verhalten beobachtet. Da sich die Wassertropfen auf den Proben sehr schnell ausbreiten und versickern, ist es in diesem Fall nicht möglich, den Benetzungswinkel auszumessen [R11]. Damit sind alle Prototypen der Kategorie $\alpha = 0^\circ$ mit einer vollständigen Benetzung zuzuordnen.

Um das Verhalten innerhalb dieser Kategorie noch weiter zu klassifizieren, wurde ein neues Messprinzip entwickelt. Auf die Oberfläche jeder Probe wurden mit einer Tropfflasche mehrere Tropfen destilliertes Wasser gegeben und deren Verhalten mit einer Videokamera aufgezeichnet. Anschließend wurden die einzelnen Videos für jeden Stein nach dem Verhalten der Wassertropfen ausgewertet und in folgende Benetzungsklassen unterteilt [R11]:

- Benetzungsklasse 1: Der Wassertropfen versickert direkt. Durch den Zement breitet sich die Feuchtigkeit jedoch an der Oberfläche aus.
- Benetzungsklasse 2: Der Wassertropfen bleibt kurz als Tropfen erhalten, bevor er an der aufgegebenen Stelle versickert.
- Benetzungsklasse 3: Der Wassertropfen zerfließt zunächst leicht an der Oberfläche, bevor er versickert.

Bei den drei Benetzungsklassen handelt es sich um drei Unterkategorien des nach DÖRFLER (2002) festgelegten Zustandes $\alpha = 0^\circ$.

Tabelle 12: Einteilung der Prototypen in die verschiedenen Benetzungsklassen [R11].

Benetzungsklasse 1	Benetzungsklasse 2	Benetzungsklasse 3
A, G, H, I, J, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, AA, Geog, Geoa	K, M, N, Gefdg, Gefda	B, C, D, E, Ff, Fr, O

Die Ergebnisse zeigen, dass der Großteil der Prototypen der Benetzungsklasse 1 zugeordnet werden kann, in der der Wassertropfen direkt an der aufgegebenen Stelle versickert, wobei sich die Feuchtigkeit durch den Zement, der die einzelnen Körner umgibt, an der Oberfläche ausbreitet (Tabelle 12). Die gefügedichten Pflaster-

steine, sowie die Prototypen M und N, die ebenfalls ein dichtes Gefüge haben und der Prototyp K gehören der Benetzungsklasse 2 an. Zu der Benetzungsklasse 3 zählen die Prototypen B, C, D, E, Ff, Fr und O, die eine gröbere Körnung haben [R11].

Während der Durchführung des Versuches war deutlich zu erkennen, dass die Benetzbarkeit der einzelnen Steine im hohen Maße von ihrem Zementgehalt abhängig ist. Je mehr die Oberfläche eines Steines durch den Zement „verschmutzt“ ist, desto weiter breitet sich die Feuchtigkeit an der Gesteinsoberfläche aus [R11]. Allerdings zeigt sich kein Zusammenhang zum w/z-Wert.

Wie die Abbildung 26 zeigt, haben die Prototypen, die den Benetzungsklassen 1 und 2 angehören, nur geringe maximale Rauigkeiten, während die Prototypen der Benetzungsklasse 3 höhere maximale Rauigkeiten zeigen [R11].

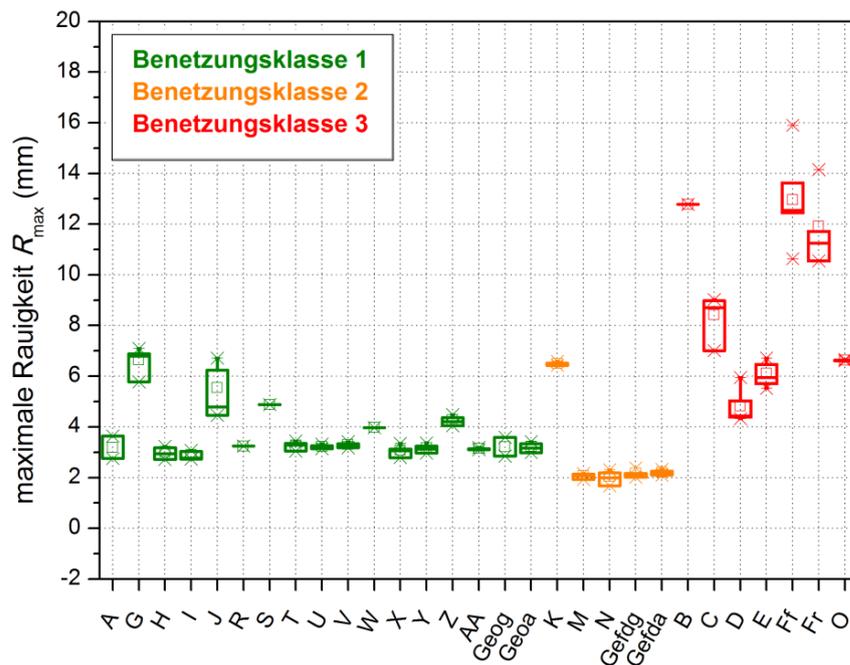


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen der Benetzungsklasse und der maximalen Rauigkeit R_{\max} [R11].

Abbildung 27 zeigt, dass ein Zusammenhang zwischen den Benetzungsklassen und den Verdunstungsraten (Kap. 84) besteht. Die Prototypen der Benetzungsklasse 1, bei denen der aufgegebene Wassertropfen direkt versickert, sich die Feuchtigkeit jedoch durch den Zement an der Oberfläche ausbreitet (Prototypen A, G, H, I, J, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, AA, Geog, Geoa), zeigen die höchsten Verdunstungsraten. Dahingegen sind die Verdunstungsraten der Prototypen, die der Benetzungsklasse 2 angehören (Prototypen K, M, N, Gefdg, Gefda), wesentlich geringer. Die Prototypen der Benetzungsklasse 3 (Prototypen B, C, D, E, Ff, Fr, O) zeigen ähnliche Verdunstungsraten wie die Prototypen der Benetzungsklasse 2, jedoch ist der mittlere Wert für die Verdunstung geringer. Die Verdunstungsrate nimmt also zu, je vollständiger die Benetzung ist, das heißt je besser sich die Feuchtigkeit an der Oberfläche der Pflastersteine ausbreitet.

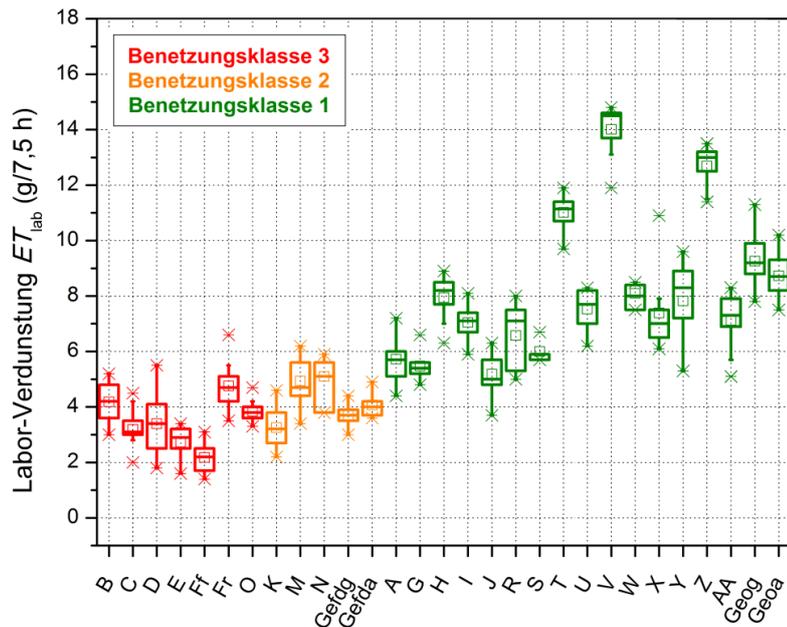


Abbildung 27: Abhängigkeit der Labor-Verdunstung ET_{lab} von den verschiedenen Benetzungsklassen [R11].

3.2.6 Wasserdurchlässigkeit

Die Wasserdurchlässigkeit von wasserdurchlässigen Pflastersteinen muss nach [BDB96] ermittelt an fünf Pflastersteinen spätestens im Alter von 18 Tagen im Mittel mindestens Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 5,4 \cdot 10^{-5}$ m/s betragen, um die maßgebende Regenspenderde $r_{10(0,2)} = 270$ l/(s·ha) versickern zu können.

Der Versuchsaufbau richtet sich nach DIN 18130-1. Zur Ermittlung der Durchlässigkeitsbeiwerte k_f der einzelnen Prototypen wurde eine Triaxialzelle des Types „Durchlässigkeitsprüfzelle D 50110 PA“ der Firma Wille Geotechnik GmbH verwendet. An der Triaxialzelle befinden sich fünf Ventile (Abbildung 28), denen folgende Funktionen zugeordnet werden können:

- Ventil 1: Wassereinlauf in Zelle
- Ventil 2: Belüftung (Ventil ohne Schlauchadapter)
- Ventil 3: Wassereinlauf in die Probe
- Ventil 4: Wasserausstrom aus Probe
- Ventil 5: Einstellung des Manteldruckes



Abbildung 28: Foto der Triaxialzelle [R11].

Die Durchlässigkeitsprüfung findet unter isotroper statischer Belastung statt. Die Probe wird in einer Latexhülle zwischen das Kopfstück und das Fußstück gespannt und mit Gummiringen abgedichtet. Das Fußstück ist fest mit dem Zellenboden verbunden und steht mit Ventil 3 in Verbindung, über das das Wasser in die Probe eingeleitet wird. Am Kopfstück werden zwei dünne Tygon[®]-Schläuche angebracht. Der zentrale Schlauch steht mit Ventil 2 in Verbindung, das der Belüftung der Probe dient. Über den seitlichen Schlauch wird das Wasser, das die Probe durchflossen hat, durch das Ventil 4 aus der Triaxialzelle heraus geleitet [R11].

Über einen Vorratsbehälter, in dem durch einen seitlichen Wasserablauf und gleichmäßigem Wasserzustrom ein konstanter Wasserspiegel eingestellt werden kann, wird der Triaxialzelle über das Ventil 1 Wasser zugeführt. Der Schlauch, der als Verbindung zwischen Vorratsbehälter und Durchlässigkeitsprüfzelle dient, ist dabei an beiden Enden durch Ventile gesichert. Durch Ventil 3 wird Wasser in die Probe eingeleitet und durchströmt diese von unten nach oben. Um zu gewährleisten, dass die Probe gleichmäßig durchströmt wird, befinden sich im Fuß- und im Kopfstück jeweils schneckenförmige Rillen (Abbildung 29). So wird das zentral zugeführte Wasser am Fußstück über die gesamte Fläche verteilt und am Kopfstück wieder gesammelt, bevor es durch Ventil 4 aus der Zelle hinaus und durch einen Schlauch in einen Messzylinder geleitet wird [R11].



Abbildung 29: Schneckenförmige Rillen im Fußstück der Triaxialzelle [R11].

Zur Einhaltung eines konstanten hydraulischen Gefälles Δh ist es notwendig, dass der oberste Punkt des Tygon[®]-Schlauches vom Kopfstück zu Ventil 4, der durch die schwarze Markierung an der Triaxialzelle gekennzeichnet ist (Abbildung 30) genau einen Zentimeter unter dem Wasserspiegel im Vorratsbehälter liegt. Außerdem muss der höchste Punkt des Schlauches, durch den das Wasser über Ventil 4 aus der Triaxialzelle in den Messzylinder geleitet wird, auf gleicher Höhe mit dem Schlauch in der Triaxialzelle und somit ebenfalls einen Zentimeter unter dem Wasserspiegel in dem Vorratsbehälter liegen.

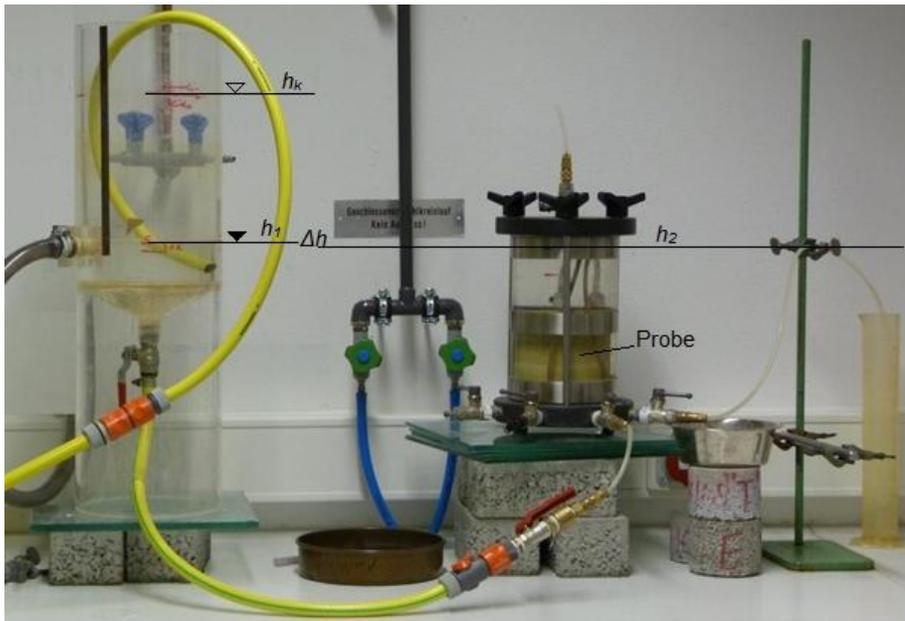


Abbildung 30: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130 [R11].

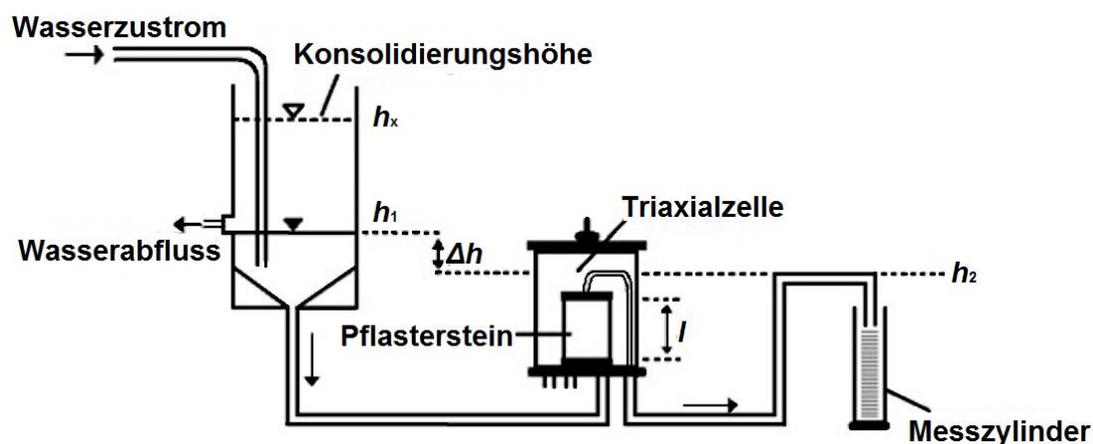


Abbildung 31: Schematischer Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130 [R11].

Die Durchführung der Durchlässigkeitsprüfung kann in drei Abschnitte gegliedert werden: den Einbau der Filterprobe, das Einstellen des Manteldruckes und die Konsolidierung der Filterprobe. Bereits vor Versuchsbeginn wurden die Proben gewässert, um einen möglichst hohen Sättigungsgrad des Porenvolumens zu erreichen und so die Konsolidierungsphase zu beschleunigen. Um Fehler beim Einbau oder der Messung zu minimieren, wird jeder Prototyp dreimal gemessen und die Triaxialzelle nach jedem Durchgang vollständig zerlegt und die Filterprobe wieder neu eingebaut [R11].

Einbau der Filterprobe: Um die Filterprobe wird zunächst eine Latexhülle gelegt, die an beiden Enden der Probe etwa drei Zentimeter übersteht. Zur Erleichterung des Anlegens der Latexhülle wird ein Abstreifzylinder verwendet, der über ei-

nen Schlauch an einen Wasserhahn angeschlossen werden kann. Die Latexhülle wird zunächst in den Abstreifzylinder gelegt und die überstehenden Enden über die Ränder des Zylinders nach außen geklappt. Anschließend wird der Abstreifzylinder an den Wasserhahn angeschlossen und dieser geöffnet. Zwischen dem Abstreifzylinder und der Latexhülle entsteht ein Vakuum, so dass die Filterprobe nun leicht in die Latexhülle hinein geschoben werden kann. Durch das Abziehen der Latexhülle von dem Abstreifzylinder schmiegt sich die Latexhülle an die Probe. Die überstehenden Enden der Latexhülle werden umgeklappt, die Probe auf das Fußstück gestellt und das Kopfstück auf die Probe gesetzt. Durch das Überziehen der Latexhülle über Fuß- und Kopfstück und das Anlegen von jeweils zwei Gummiringen an Fuß- und Kopfstück wird die Probe eingebaut [R11].

Einstellung des Manteldruckes: Als Manteldruck wird der Druck bezeichnet, der innerhalb der Triaxialzelle isotrop auf die Filterprobe wirkt. Zunächst wird die Probe wie oben beschrieben eingebaut und die Zelle fest verschlossen. Dann wird das Ventil 1 der Triaxialzelle mit Hilfe einer geeigneten Schlauchkoppelung mit einem Wasserhahn verbunden und die Zelle mit Wasser gefüllt. Dabei sind die Ventile 4 und 5 ebenfalls geöffnet, die Ventile 2 und 3 sind geschlossen. Durch das Öffnen von Ventil 4 beim Befüllen der Triaxialzelle, kann das Anpressen der Latexhülle an die Filterprobe besser kontrolliert werden. Das Befüllen der Zelle erfolgt, indem der Wasserhahn sowie das Ventil 1 geöffnet werden und der Wasserzustrom in die Zelle so reguliert wird, dass der Wasserstrahl anfangs etwa bis auf die Höhe der grünen Markierung (Abbildung 28) an der Zelle sprudelt. Während des Wasseraufstiegs kann die Luft durch Ventil 5 entweichen. Erreicht der Wasserspiegel in der Zelle die rote Markierung (Abbildung 28), wird Ventil 5 geschlossen und die noch in der Zelle befindliche Luft wird durch das weitere Aufsteigen des Wassers komprimiert und baut so einen Druck, den isotropen Manteldruck, innerhalb der Zelle auf. Erreicht der Wasserspiegel die untere Kante der obersten Alu-Bandage, sollte der Manteldruck soweit angestiegen sein, dass die Latexhülle in die Porenräume der Filterprobe eingedrückt wurde. Das Ventil 1 wird geschlossen und der Wasserhahn abgedreht. Nach dem Einstellen des Manteldruckes wird der Schlauch von Ventil 1 entfernt [R11].

Konsolidierung der Probe: Nachdem die Filterprobe in die Zelle eingebaut wurde und der Manteldruck angelegt ist, muss die noch in der Filterprobe vorhandene Luft aus ihr ausgetrieben werden. Dieser Vorgang wird als Konsolidierung bezeichnet. Hierzu wird der Überlauf des Vorratsbehälters verschlossen und dieser bis zur Markierung der Konsolidierungshöhe (Abbildung 30 und Abbildung 31) aufgefüllt. Der hydrostatische Gradient beträgt bei dieser Konsolidierungshöhe etwa 20 cm. Der Auslass des Vorratsbehälters wird mit Ventil 3 der Triaxialzelle verbunden, durch das das Wasser von unten nach oben durch die Filterprobe strömt und durch das Ventil 4 wieder verlässt. Das austretende Wasser wird in einer Schüssel aufgefangen. Die Konsolidierung der Filterprobe ist daran zu erkennen, dass Luftblasen durch die transparenten Tygon®-Schläuche aus der Filterprobe austreten. Sie ist hinreichend, wenn für etwa eine Minute keine Luftblasen mehr aus der Probe austreten. Nach

Abschluss der Konsolidierung werden zunächst das Ventil 4 und dann der Wasserhahn geschlossen und das Wasser in dem Vorratsbehälter wieder auf die Höhe des Überlaufes abgelassen. Dabei bleibt Ventil 3 geöffnet, da durch das Nachströmen von Wasser aus dem Vorratsbehälter ein mögliches Eindringen von Luft verhindert wird [R11].

Die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit der Filterproben erfolgt nach DIN 18130-1 mit nach oben gerichteter Strömungsrichtung bei stationärem hydraulischem Gefälle und einem hydraulischen Druckgradienten von $\Delta h = 1$ cm. Nachdem die Probe ordnungsgemäß eingebaut wurde und die Konsolidierung abgeschlossen ist, wird die Durchlässigkeit ermittelt, indem der Volumenstrom \dot{V} durch die Filterprobe mit Hilfe eines Messzylinders gemessen wird. Für die Messung ist der Wasserspiegel im Vorratsbehälter so einzustellen, dass der kontinuierliche Wasserzustrom dem Wasserausstrom aus diesem entspricht und der Wasserstand auf der Höhe h_1 (Abbildung 31) konstant gehalten wird. Es ist weiterhin darauf zu achten, dass sich der Schlauch, der das aus der Triaxialzelle austretende Wasser in den Messzylinder leitet, auf der Höhe der Tygon[®]-Schläuche in der Triaxialzelle und einen Zentimeter unterhalb des Wasserspiegels im Vorratsbehälter befindet (Abbildung 31) [R11].

Die Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) für die Einzelmessungen der Steine eines Prototyps (Anhang 2.6) schwanken zum Teil stark (Abbildung 32). Dabei ist jedoch nicht außer Acht zu lassen, dass es sich um Schwankungen im Bereich der dritten Dezimalstelle handelt. Die gefügedichten Pflastersteine Gefdg und Gefda und der Prototyp V sind wasserundurchlässig und auch die Prototypen M, N und AA zeigen nur sehr geringe mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_f = 1,39 \cdot 10^{-4}$ m/s (M), $k_f = 2,73 \cdot 10^{-5}$ m/s (N) und $k_f = 1,68 \cdot 10^{-7}$ m/s (AA). Auffällig sind außerdem die Prototypen B und U, die mit geringen mittleren Durchlässigkeitsbeiwerten von $k_f = 4,81 \cdot 10^{-4}$ m/s (B) und $k_f = 4,89 \cdot 10^{-4}$ m/s (U) einen großen Schwankungsbereich zeigen. Der geoSTON[®] protect hat mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_f = 1,25 \cdot 10^{-4}$ m/s (Geog) und $k_f = 1,3 \cdot 10^{-4}$ m/s (Geoa). Die Durchlässigkeitsbeiwerte der übrigen Prototypen liegen im Mittel alle über $1 \cdot 10^{-3}$ m/s. Die höchsten Wasserdurchlässigkeiten haben mit mittleren Durchlässigkeitsbeiwerten von $k_f = 2,16 \cdot 10^{-3}$ m/s und $k_f = 2,02 \cdot 10^{-3}$ m/s die Prototypen Ff und G. Die geringen Wasserdurchlässigkeiten der gefügedichten Betonpflastersteine und der Prototypen M, N, V und AA sind dadurch zu erklären, dass diese vollständig oder zum Teil aus gefügedichtem Beton bestehen, so dass keine/kaum Poren im Stein vorhanden sind, durch die das Wasser fließen kann [R11].

Die Prototypen C, Fr, T, U und X haben mit Werten zwischen $\sigma = 3,73 \cdot 10^{-4}$ (X) und $\sigma = 5,26 \cdot 10^{-4}$ (U) relativ hohe Standardabweichungen. Mit Werten zwischen $\sigma = 2,84 \cdot 10^{-5}$ (N) und $\sigma = 6,93 \cdot 10^{-5}$ (S) sind die Standardabweichungen für die Prototypen N, R, S, Y, und den geoSTON[®] protect in grau (Geog) und anthrazit (Geoa) eher gering. Die zum Teil gefügedichten Prototypen V, AA und der gefügedichte Pflasterstein in grau (Gefdg) und anthrazit (Gefda) haben Standardabweichungen von $\sigma \leq 1,68 \cdot 10^{-7}$ [R11].

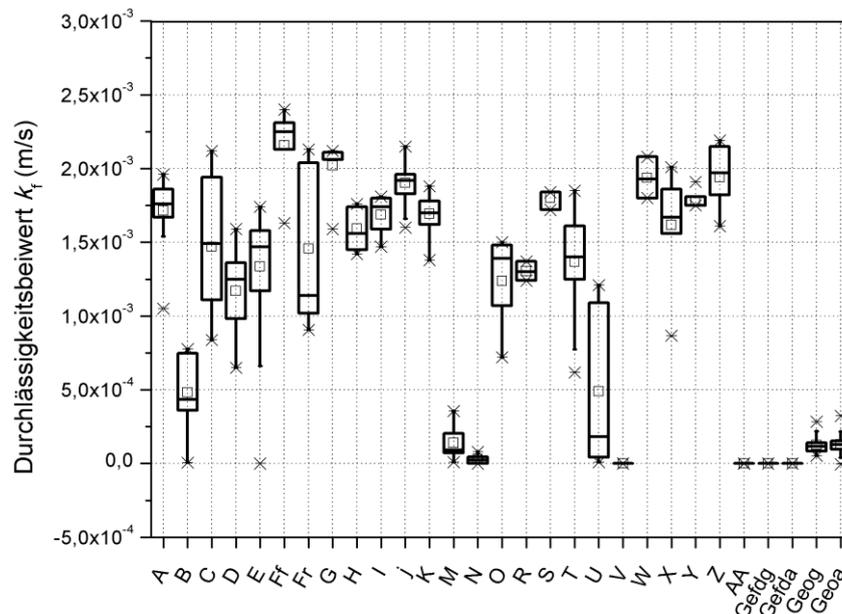


Abbildung 32: Ergebnisse der Messung der Wasserdurchlässigkeit [R11].

3.2.7 Wasseraufnahmevermögen

Das Wasseraufnahmevermögen w_{WAV} ist die von einer bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Probe aufgesaugte maximale Wassermasse $m_{W,sat}$, bezogen auf die Trockenmasse m_d der Probe (DIN 18132).

In diesem Fall wird das Wasseraufnahmevermögen der einzelnen Proben durch Wägen der Probe jeweils im getrockneten und im wassergesättigten Zustand bestimmt. Die Differenz aus dem Sättigungsgewicht $m_{W,sat}$ (g) und dem Trockengewicht m_d (g) ergibt dann das Wasseraufnahmevermögen w_{WAV} der Probe in g.

$$w_{WAV} = m_{W,sat} - m_d \quad \text{Gl. 16}$$

Durch die Umrechnung des Wasseraufnahmevermögens von g in Vol.-% wird das Wasseraufnahmevermögen auf das Probenvolumen V_{Probe} (cm³) bezogen.

$$w_{WAV} = \frac{w_{WAV}}{V_{Probe}} \cdot 100 \quad \text{Gl. 17}$$

Die Proben werden zunächst im Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und das Trockengewicht m_d durch Wägung bestimmt. Anschließend werden die Proben für mindestens 24 h in einen Behälter mit destilliertem Wasser gestellt, so dass sie vollständig unter Wasser stehen. Um sicher zu gehen, dass keine Luft in den Poren zurückbleibt, wird der Behälter mehrmals durch Klopfen bewegt. Steigen keine Luftblasen mehr aus den Proben auf, werden sie gewogen, um das Sättigungsgewicht $m_{W,sat}$ zu bestimmen. Bei der Wägung ist darauf zu achten, dass die Proben ruhig, aber zügig aus dem Wasserbad genommen und zum Wägen in einen Behälter überführt werden, um den Wasserverlust aus der Probe möglichst gering zu halten [R11].

Um Fehler bei der Messung auszuschließen, wird das Wasseraufnahmevermögen jeder Probe dreimal bestimmt. Dabei sind die Proben nach jeder Sättigung zunächst wieder bei 105 °C zu trocknen und das Trockengewicht erneut zu bestimmen [R11].

Die Mittelwerte des durch Wägung bestimmten Wasseraufnahmevermögens (Anhang 2.7) liegen zwischen $w_{WAV} = 6,51$ Vol.-% (Gefda) und $w_{WAV} = 27,08$ Vol.-% (Prototyp I) (Abbildung 33). Neben dem gefügedichteten Pflasterstein in Anthrazit haben auch der gefügedichtete Pflasterstein in grau ($w_a = 6,73$ Vol.-%) und der Prototyp N ($w_{WAV} = 8,70$ Vol.-%) nur ein sehr geringes mittleres Wasseraufnahmevermögen. Mit $w_{WAV} = 10,09$ Vol.-% (Geog) und $w_{WAV} = 10,05$ Vol.-% (Geoa) hat der geoS-TON[®] protect ebenfalls ein recht geringes mittleres Wasseraufnahmevermögen. Das Wasseraufnahmevermögen für die Prototypen M, R, S, T, V und Z liegt im Mittel zwischen 10 und 15 Vol.-%, während das mittlere Wasseraufnahmevermögen für die Prototypen B, C, E, Fr, K, O, U, X, Y und AA zwischen 15 und 20 Vol.-% liegt. Die Prototypen A, D, G, H, I, J, Ff und W haben ein mittleres Wasseraufnahmevermögen von $w_{WAV} > 20$ Vol.-% [R11].

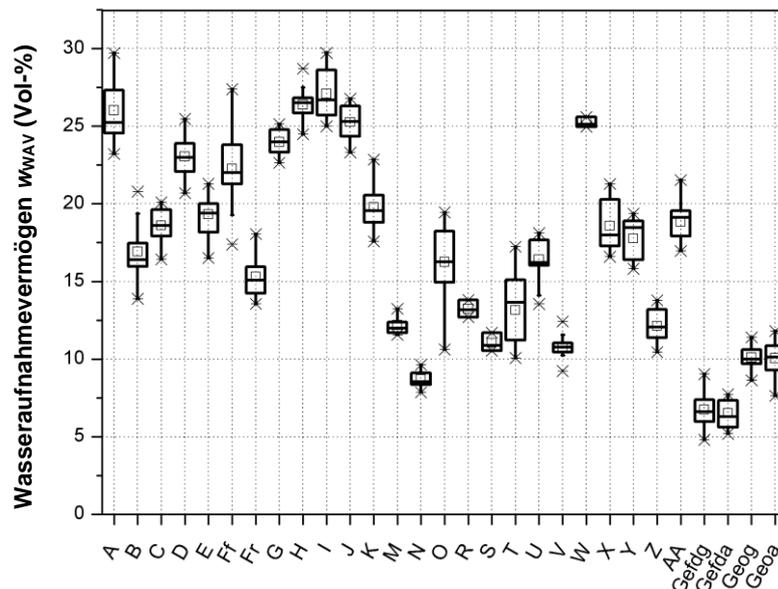


Abbildung 33: Ergebnisse der Messung des Wasseraufnahmevermögens durch Wägung [R11].

Die Standardabweichung der meisten Prototypen liegt zwischen $\sigma = 1$ und $\sigma = 1,5$. Die geringste Standardabweichung zeigt der Prototyp W mit $\sigma = 0,32$, die höchste der Prototyp Ff mit $\sigma = 2,7$. Die Prototypen A ($\sigma = 1,86$), B ($\sigma = 1,87$), O ($\sigma = 2,2$) und T ($\sigma = 2,23$) haben ebenfalls recht hohe Standardabweichungen.

3.2.8 Wasserhaltevermögen

Das Wasserhaltevermögen beschreibt die Masse an Wasser, die die Probe nach vollständiger Sättigung gegen die Schwerkraft halten kann. Das Wasserhaltevermögen wird ebenfalls durch Wägung bestimmt. Um das Wasserhaltevermögen w_{WHV} zu ermitteln, wird die Probe nach der Bestimmung des Sättigungsgewichtes $m_{W,sat}$ zum

Abtropfen auf ein leicht schräg stehendes Sieb gestellt. Nach 15 Minuten wird die Probe dann erneut gewogen und so das Abtropfgewicht $m_{W,teilsat}$ der Probe bestimmt. Die Differenz aus dem Abtropfgewicht $m_{W,teilsat}$ (g) und der Trockenmasse m_d (g) ergibt das Wasserhaltevermögen in g.

$$w_{WHV} = m_{w,teilsat} - m_d \quad \text{Gl. 18}$$

Durch Beziehen des Wasserhaltevermögens w_{WHV} (g) auf das Probenvolumen V_{Probe} (cm^3) ergibt sich das Wasserhaltevermögen w_{WHV} in Vol.-%.

$$w_{WHV} = \frac{w_{WHV}}{V_{Probe}} \cdot 100 \quad \text{Gl. 19}$$

Die gefügedichteten Pflastersteine (Anhang 2.8) zeigen mit Mittelwerten von $w_{WHV} = 4,78$ Vol.-% (Gefdg) und $w_{WHV} = 4,29$ Vol.-% (Gefda) das geringste Wasserhaltevermögen, während die Prototypen A ($w_{WHV} = 21,42$ Vol.-%), H ($w_{WHV} = 20,74$ Vol.-%), I ($w_{WHV} = 21,3$ Vol.-%) und W ($w_{WHV} = 22,2$ Vol.-%) ein recht hohes Wasserhaltevermögen haben (Abbildung 34). Das Wasserhaltevermögen der Prototypen D, X, Y und AA liegt zwischen 15 und 20 Vol.-%. Für alle übrigen Prototypen liegt das Wasserhaltevermögen bei $7 < w_{WHV} < 15$ Vol.-%. Der geoSTON® protect hat ein mittleres Wasserhaltevermögen von 9,15 Vol.-% (Geog) und 9,45 Vol.-% (Geoa) [R11].

Die Werte der Einzelmessungen des Prototypen U zeigen den größten Schwankungsbereich (Abbildung 34). Die höchsten Standardabweichungen haben die Prototypen U ($\sigma = 2,37$) und W ($\sigma = 2,79$).

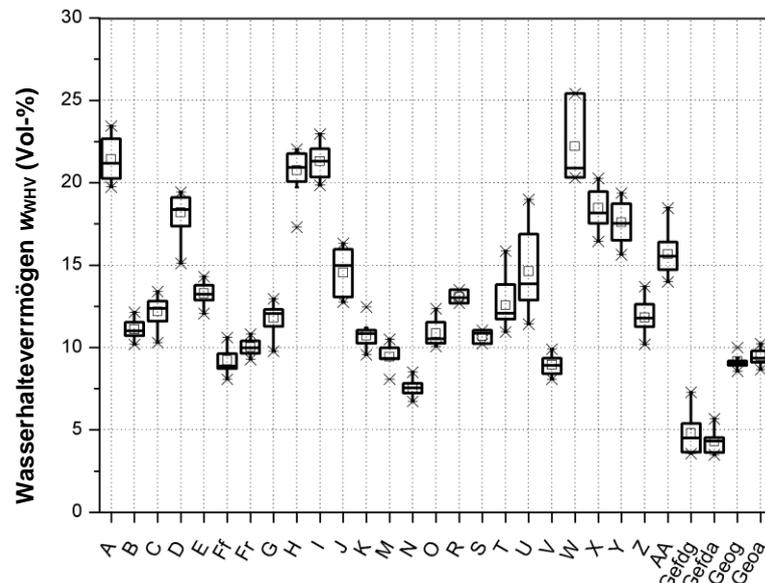


Abbildung 34: Ergebnisse der Messung des Wasserhaltevermögens [R11].

3.2.9 Frostprüfung

Die Frostprüfung wurde mittels Bestimmung der Widerstandsfähigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel in Anlehnung an die DIN EN 12371 (Verfahren A) mit 30 Frost-Tau-Zyklen durchgeführt. Da die wasserdurchlässigen, haufwerksporigen Beton-Pflastersteine nicht mit Tausalz beaufschlagt werden dürfen [BDB96], entfällt die Untersuchung der Salzeinwirkung. Eine erste Beurteilung der Schädigung mittels Sichtprüfung fand nach 5/10/15/20/25/30 Zyklen statt. Nach 0/10/20/25/30 Zyklen fand eine Messung des Gewichtsverlustes nach dem Auftauen und dem Trocknen der Probe (mittels Wägung der Abwitterung), eine Messung des scheinbaren Volumens (mittels Wägung des Probenkörpers unter Wasser und oberflächentrocken an der Luft) sowie eine Beurteilung der inneren Schädigung (mittels Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls mit dem Pundit-Gerät) statt. Der Frostprüfung wurden geoSTON[®] protect grau (Geog) (Dreifachbestimmung) und Prototyp T (Fünffachbestimmung) unterzogen. Die Anforderungen an die Abwitterung infolge Frosteinwirkung liegen nach [BDB96] bei < 0,5 % (kein Einzelwert darf 0,8 % überschreiten) bzw. nach TL Pflaster St-B 06 für Beton (Frost-Tausalz-Widerstand) bei < 1 kg/m² (Kategorie F1 für Naturstein). Der Anteil der Abnahme des dynamischen Elastizitätsmoduls sollte nicht größer als 30% sein.

Für Prototyp T_M ergab die Sichtprüfung, dass die fünf Prüfkörper intakt sind. Der Anteil der Abwitterung liegt zwischen 0,05 % und 0,12 % (Mittelwert 0,09 %); dies entspricht 0,078 kg/m² bis 0,193 kg/m² und liegt damit unter 1 kg/m². Das Verhalten entspricht somit Kategorie F1 für Natursteine. Der Anteil der Abnahme des dynamischen Elastizitätsmoduls liegt zwischen 1,7% und 2,5%, gemessen über die Steinbreite, und 1,4% bis 2,1%, gemessen über die Steinhöhe.

Für Prototyp Geog wurde die Prüfung 33 Tage nach Herstellung durchgeführt. Insgesamt wurden hier 28 Frost-Tau-Wechsel durchgeführt. Die Sichtprüfung nach jedem Wechsel ergab, dass die drei Prüfkörper intakt sind. Der Anteil der Abwitterung liegt für alle drei Prüfkörper bei 0,06 %; dies entspricht 0,295 kg/m² und liegt damit unter 1 kg/m². Das Verhalten entspricht somit Kategorie F1 für Natursteine. Der Anteil der Abnahme des dynamischen Elastizitätsmoduls liegt zwischen 1,7% und 2,5% gemessen über die Steinbreite und 1,4% bis 2,1% gemessen über die Steinhöhe.

Da im Laufe des Vorhabens keine weiteren Prototypen für die weitere Verwendung im Geländeversuch ausgewählt wurden, wurde auf die Frostprüfung der weiteren Prototypen, deren Produktion jeweils im Werk hätte stattfinden müssen, verzichtet. Die Ergebnisse gehen nicht in die statistische Auswertung ein.

Mit der Untersuchung der Frostprüfung ist nun sichergestellt, dass die Frosteinwirkung zu keiner tiefgreifenden Schädigung des Pflastersteins führen wird und damit ein Einsatz der entwickelten Pflastersteine in kalten Klimaten möglich ist.

3.2.10 Saugspannung

Die Saugspannung an den Prototypen wurde nach der bereits bei den Lockermaterialien beschriebenen Methode (Kap. 3.1.13) insgesamt einmal bei pF 1,8, dreimal bei pF 2,5, zweimal bei pF 3 und einmal bei pF 4,2 gemessen (Tabelle 13).

Tabelle 13: Auflistung der verschiedenen Messreihen der Sauspannung an den Prototypen.

pF-Stufe	Zeitraum	Proben
1,8	15.09.10 - 01.10.10	3x Prototyp A, 3x Prototyp B, 4x Prototyp Geog, 4x Prototyp Geoa
	24.08.10 - 10.09.10	3x Prototyp A, 3x Prototyp B, 4x Prototyp Geog, 4x Prototyp Geoa
2,5	07.10.10 - 05.11.10	3x Prototyp A, 3x Prototyp B, 4x Prototyp Geog, 4x Prototyp Geoa
	07.12.10 - 07.04.11	2x Prototyp A, 1x Prototyp B, 4x Prototyp Geog, 4x Prototyp Geoa
3	08.06.10 - 24.06.10	8x Prototyp Geog, 8x Prototyp Geoa
	01.12.10 - 07.04.11	1x Prototyp A, 2x Prototyp B, 4x Prototyp Geog, 4x Prototyp Geoa
4,2	22.12.10 - 02.03.11	1x Prototyp Geog, 1x Prototyp Geoa

Die Untersuchung der Saugspannung an haufwerksporigen Betonsteinen hat sich als sehr schwierig herausgestellt. Laut Literatur kommt das Verfahren bei den eingesetzten groben Materialien an seine Grenzen. Nach mehreren Versuchungen und Optimierungen der Laborbedingungen und Feinjustierungen der Druckanlage wurde eine 4 Monate lange Messung (Dezember 2010 bis zum April 2011) an den pF-Stufen 2,5 und 3 an vier unterschiedlichen Materialien durchgeführt und mit einer älteren Messung der pF-Stufe 1,8 (15.09.10 bis 01.10.10) verknüpft (Anhang 2.9). Die pF-Stufe 4,2 wurde ebenfalls an 2,5 cm mächtigen Steinscheiben (10 cm · 10 cm · 1,3 cm große Platte aus dem geoSTON® protect in den Farben grau und anthrazit aus dem Übergangsbereich von Vorsatzschicht zu Kernbeton Vorsatzschicht zu Kernbeton) gemessen (Tabelle 13) [R11]. Aus Zeitgründen musste auf die Untersuchung weiterer Prototypen verzichtet werden.

Für die pF-Stufen 1,8, 2,5 und 3 ist nun für alle Steine ein klarer Trend in der Abnahme des Wassergehaltes mit zunehmendem Druck zu erkennen (Abbildung 35). Bei Erhöhung der Druckstufe von pF 3 auf pF 4,2 liegen die Wassergehalte des Prototyp Geog und des Prototyp Geoa jedoch wieder deutlich über dem Wassergehalt der geringeren Druckstufen. Die Zunahme des Wassergehaltes von pF 3 auf pF 4,2 kann darauf zurückzuführen sein, dass für die Messung der hohen pF-Stufe nur Pflastersteinscheiben verwendet werden konnten [R11].

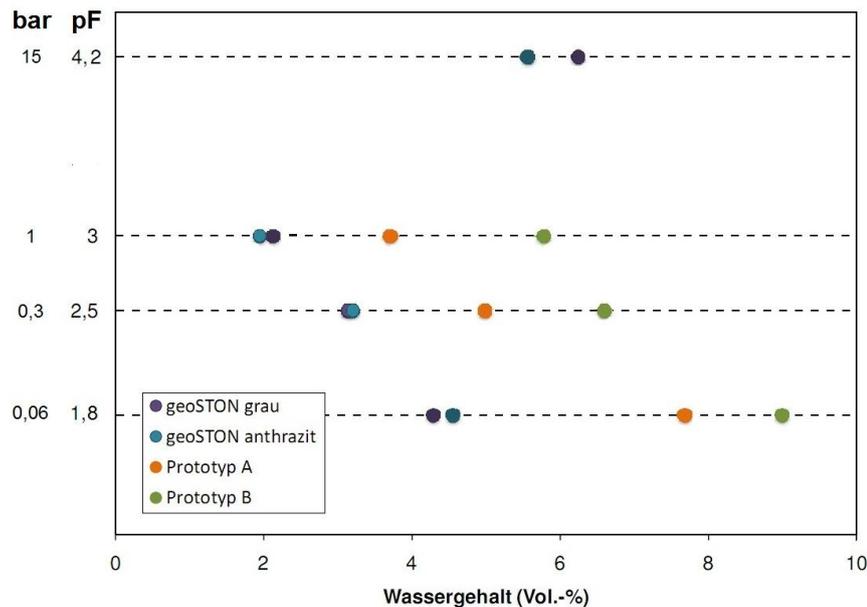


Abbildung 35: Saugspannungs-Diagramm für den geoSTON[®] protect grau (Geog) und anthrazit (Geoa) und die Prototypen A und B für die pF-Stufen 1,8 (15.09.10 bis 01.10.10), 2,5 (07.12.10 bis 07.04.11), 3 (01.12.10 bis 07.04.11) und 4,2 (22.12.10 bis 02.03.11) [R11].

Die Wassergehalte für entsprechende pF-Stufen sind für die haufwerksporigen Betonsteine geringer als die vergleichbaren für das Fugenmaterial Füllsand 0/2 aber höher als die vergleichbaren für das Fugenmaterial Basaltsplitt 1/3 (Kap. 3.1.13). Der grobkörnige einschichtige Prototyp B mit Korngröße 0/8 kann über alle Druckstufen hinweg 1,5 bis 2 Vol.-% mehr Wasser halten als der feinkörnige einschichtige Prototyp A mit Korngrößen 1/2,2. Diese Aussage korreliert auch mit dem Verdunstungsverhalten; Prototyp A zeigt höhere Verdunstungsraten im Labor als Prototyp B (Kap. 3.2.12). Direkt nach einem Regenereignis ist allerdings der Wassergehalt umgekehrt, wie das Wasseraufnahme- und -haltevermögen (Kap. 3.2.7 und Kap. 3.2.8) zeigt. Die beiden geoSTON[®] protect Betonsteine zeigen ein sehr ähnliches Verhalten mit eher geringen Wasserhaltevermögen der entsprechenden Druckstufen. Dies zeigte sich auch bereits nach einem Regenereignis anhand des Wasseraufnahme- und -haltevermögens (Kap. 3.2.7 und Kap. 3.2.8). Ebenso zeigen die geoSTON[®] protect Betonsteine höhere Verdunstungsraten als Prototyp A und B (Kap. 3.2.12). Der Prototyp Geoa kann bei kleineren Druckstufen mehr Wasser halten; mit steigenden Drücken nimmt aber das Vermögen ab und der Prototyp Geog kann etwas mehr Wasser halten. Für die vier Prototypen lässt sich abschließend zusammenfassen, dass die Saugspannung negativ mit der Verdunstungsrate im Labor korreliert.

3.2.11 Thermische Eigenschaft

Die thermischen Eigenschaften der Pflastersteine lassen sich ebenso wie die der Lockermaterialien (Kap. 3.1.14) beschreiben. Die thermischen Eigenschaften der einzelnen Prototypen wurden mit Hilfe der Oberflächensonde gemessen. Dafür mussten die Steine zunächst an der Oberseite angeschliffen werden, damit die Sonde gleichmäßig auf der Oberfläche aufliegt.

Die Wärmeleitfähigkeit λ , die volumenbezogene Wärmekapazität c_p und die Temperaturleitfähigkeit a wurden jeweils an einem Stein eines Prototypen dreimal in den drei beschriebenen Szenarien S1 (trockene Probe), S2 (feuchte Probe) und S3 (gesättigte Probe) gemessen (Anhang 2.10). Für den Prototyp S waren keine Messungen möglich, da dieser aufgrund seiner instabilen Kornstruktur nicht angeschliffen werden konnte.

Die Werte für die Wärmeleitfähigkeit λ liegen zwischen 0,25 und 2,73 W/(m·K) (S1), zwischen 0,40 und 2,89 W/(m·K) (S2) und zwischen 0,48 und 3,22 W/(m·K) (S3). Die Wärmeleitfähigkeit nimmt also, bis auf wenige Ausnahmen, mit steigendem Wassergehalt zu. Die Werte steigen jedoch nicht für jeden Prototyp um den gleichen Faktor an, so dass die drei Kurven der einzelnen Szenarien für die Wärmeleitfähigkeit λ nicht parallel zueinander verlaufen (Abbildung 36). Für alle drei Szenarien zeigt der Prototyp E die höchste Wärmeleitfähigkeit λ , während die Wärmeleitfähigkeit für den Prototyp W, der aus Basaltsplitt besteht, am geringsten ist. Der aus Glaskügelchen bestehende Prototyp R ($\lambda = 0,54$ bis $0,71$ W/(m·K)) und der Prototyp D ($\lambda = 0,91$ bis $1,09$ W/(m·K)), der aus Hartkalkstein besteht, zeigen ebenfalls recht geringe Wärmeleitfähigkeiten [R11].

Für die volumenbezogene Wärmekapazität c_p liegen die Werte zwischen $1,45 \cdot 10^6$ und $2,08 \cdot 10^6$ J/(m³·K) (S1), zwischen $1,60 \cdot 10^6$ und $2,32 \cdot 10^6$ J/(m³·K) (S2) und zwischen $1,65 \cdot 10^6$ und $2,4 \cdot 10^6$ J/(m³·K) (S3). Auch für die volumenbezogene Wärmekapazität c_p steigen die Werte mit zunehmendem Wassergehalt unregelmäßig an (Abbildung 36). Die geringste volumenbezogene Wärmekapazität c_p hat in allen drei Szenarien der Prototyp W. Im trockenen Zustand hat der Prototyp M mit $c_p = 2,08 \cdot 10^6$ J/(m³·K) die höchste volumenbezogene Wärmekapazität, während im angefeuchteten Zustand der Geog ($c_p = 2,32 \cdot 10^6$ J/(m³·K)) und im gesättigten Zustand der Geoa ($c_p = 2,40 \cdot 10^6$ J/(m³·K)) die höchste volumenbezogene Wärmekapazität zeigen [R11].

Der Prototyp E zeigt mit Werten von $a = 1,34 \cdot 10^{-6}$ m²/s (S1 und S2) und $a = 1,36 \cdot 10^{-6}$ m²/s (S3) die höchste Temperaturleitfähigkeit. Die meisten Prototypen schwanken – ebenso wie die beiden Referenzsteine Geog und Geoa – zwischen $a = 0,9 \cdot 10^{-6}$ bis $1,3 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Die geringste Temperaturleitfähigkeit a hat in allen drei Szenarien der Prototyp W ($a = 0,17 \cdot 10^{-6}$ bis $0,29 \cdot 10^{-6}$ m²/s). Auch die Prototypen D ($a = 0,50 \cdot 10^{-6}$ bis $0,53 \cdot 10^{-6}$ m²/s) und R ($a = 0,33 \cdot 10^{-6}$ bis $0,39 \cdot 10^{-6}$ m²/s) zeigen sehr geringe Temperaturleitfähigkeiten (Abbildung 36). Die Temperaturleitfähigkeit a nimmt ebenfalls mit zunehmendem Wassergehalt zu.

Da die Wärmeleitfähigkeit, die volumenbezogene Wärmekapazität und die Temperaturleitfähigkeit an jeweils nur einem Stein eines Prototyps gemessen wurden, sind die Standardabweichungen sehr gering und zeigen keine besonderen Auffälligkeiten [R11].

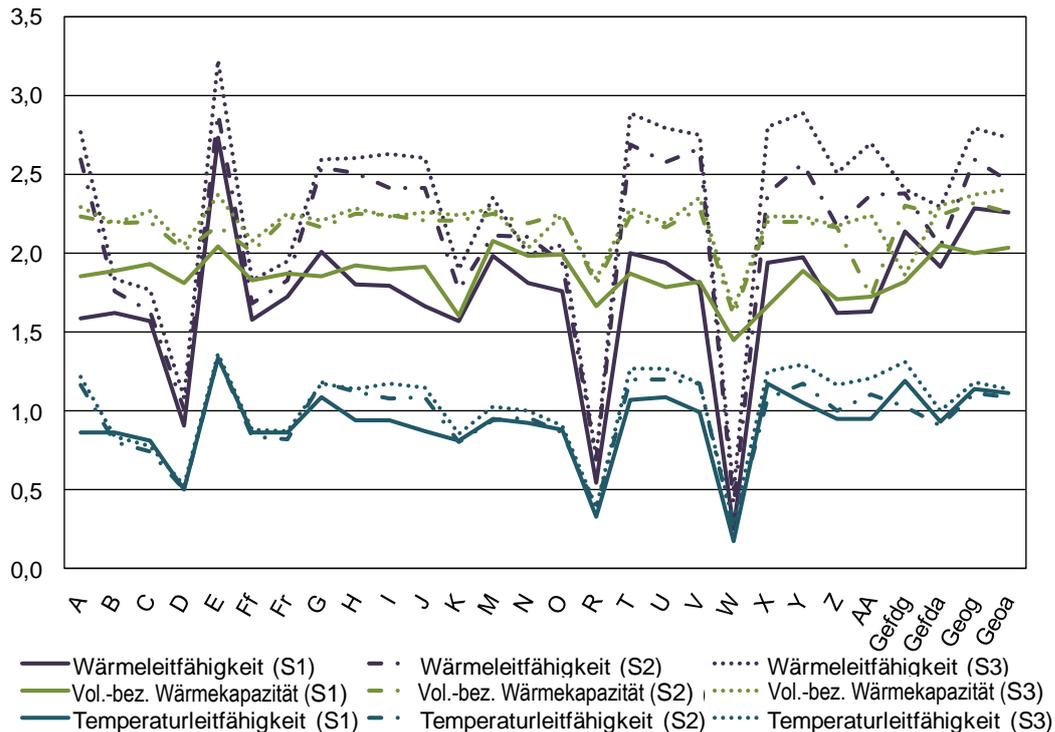


Abbildung 36: Ergebnisse der Messung der thermischen Eigenschaften an Pflasterstein-Prototypen für drei Feuchteszenarien (Wärmeleitfähigkeit λ (W/(m·K)), volumenbezogene Wärmekapazität c_p (10^6 J/(m³·K) und Temperaturleitfähigkeit a (10^{-6} m²/s) im trockenen Zustand (S1), im feuchten Zustand nach Zugabe von 20 ml Wasser (S2) und im vollgesättigten Zustand (S3)) [R11].

3.2.12 Verdunstung

Für die zweite Messfeldbelegung wurden insgesamt 25 neue Prototypen der Pflastersteine entwickelt. Da das Messfeld jedoch nur 7 Flächen besitzt und die Referenzfläche darüber hinaus noch bestehen bleiben soll, musste eine Vorauswahl getroffen werden, um Prototypen mit einer möglichst hohen Verdunstungsrate im Feld zu messen. Die Vorauswahl sollte durch eine Verdunstungsmessung im Labor erfolgen. Die Ergebnisse sollten möglichst schnell, wenig kostenintensiv, aber in erster Linie reproduzierbar sein. Daher wurden für die Laborverdunstungsmessungen die Eingangsgrößen (Niederschlagshöhe/Bewässerung, Strahlung/Energiezufuhr, Windgeschwindigkeit/Luftströmung) für alle Messungen konstant gehalten. Eine ausführliche Darstellung der Neuentwicklung der Verdunstungsmessung im Labor (LEMD) kann [SC11] entnommen werden.

Der Verdunstungsvorgang findet in einer Verdunstungszelle statt. Diese besteht aus einem handelsüblichen Kübel aus Polypropylene (PP) dieser ist 0,36 m hoch, weist an der Basis einen Durchmesser von 0,6 m auf und läuft zum oberen Ende konisch auf einen Durchmesser von 0,46 m zu. Der obere Rand des Kübels wird mit Moosgummi beklebt und anschließend wird der Kübel mit der Öffnung nach unten auf einen Tisch platziert. Das Moosgummi schließt dabei luftdicht ab. Auf 0,19 m Höhe werden in die Verdunstungszelle zwei sich gegenüberliegende Löcher mit einem Durchmesser von je 0,12 m gebohrt. In diese werden Rohre aus PP (eins 1,24 m

lang, das andere 2,36 m lang, innerer Durchmesser je 0,11 m) gesteckt. Die Rohre werden bis in die Verdunstungszelle geschoben, so dass im Zentrum der Verdunstungszelle lediglich 0,2 m Abstand zwischen den beiden Rohren ist. Der Übergang von den Rändern der gebohrten Löcher in der Verdunstungszelle zu den eingesteckten Rohren wird mit Silikon abgedichtet.

Am längeren Rohr (2,3 m) wird ein handelsüblicher Computerlüfter (Firma Sunonwealth Electric Machine Industry Co, Ltd, „KD1208PKB1“, mit maximalem Luftdurchsatz $0,0184 \text{ m}^3/\text{s}$) eingebaut. Dieser generiert einen konstanten Luftstrom, welcher vom kürzeren Rohr durch die Verdunstungszelle in das längere Rohr geht. Der Lüfter ist über einen Transformator steuerbar. Somit kann bei eventuell auftretenden Verschleißerscheinungen am Lüfter per Hand nachreguliert werden.

Vom Lüfter aus in Richtung Verdunstungskammer wird in 1 m Abstand ein Loch (0,03 m Durchmesser) in das Rohr gebohrt. Hier kann bei Bedarf ein Thermoanemometer (Firma Testo, Messbereich \bar{u}_{air} von 0 to 5 m/s) in den Luftstrom eingeführt werden. Mit dem Thermoanemometer kann die Windgeschwindigkeit im Rohr gemessen werden und so kontrolliert werden. Es sollen konstante Windgeschwindigkeiten von 0,39 m/s im Rohr herrschen. Die Kontrollmessung erfolgt einmal pro Tag. Nach der Messung wird das gebohrte Loch mit Klebefolie abgedichtet.

In die Oberseite der Verdunstungszelle wird ein Loch mit einem Durchmesser von 0,2 m geschnitten. Auf diesem Loch wird ein abnehmbarer Lampenschirm aus Aluminium so installiert. Zur Abdichtung des Überganges von Lampenschirm zu Verdunstungszelle wird wiederum Moosgummi benutzt. Als Energiequelle wird eine Rotlichtlampe (Typ „Parabol“ der Firma Radium) mit 60 Watt installiert.

Am Boden der Verdunstungszelle wird eine Waage installiert (Typ „DS 8K0,1“ der Firma Kern&Sohn mit einem Wägebereich von 0 bis 810 g und einer Wägegenauigkeit von 0,1 g). Die Waage befindet sich exakt in der Mitte und die Waagenaufgabe 0,1 m unterhalb der beiden Rohre, deren Achse exakt über der Waage verläuft. Die Waage ist über eine RS-232 Schnittstelle mit einem Computer verbunden. Mittels einer Software (Kern Balance Connection) kann jede Minute das von der Waage ermittelte Gewicht ausgelesen und gespeichert werden.

Vorbereitende Tests zeigen, dass die Waage auf Wärme reagiert. Veränderungen der Umgebungstemperatur wirkten sich direkt auf das ermittelte Gewicht aus. Daher muss zusätzlich zu den bereits genannten konstanten Größen auch die Temperatur innerhalb der Verdunstungszelle konstant gehalten werden. Mit dem oben beschriebenen Messaufbau konnte eine konstante Temperatur, gemessen auf Höhe der Waage, bei 45°C erreicht werden.

In beide Rohre wurden 0,14 m von der Verdunstungszelle entfernt jeweils ein Loch mit dem Durchmesser von 0,02 m in die Oberseite gebohrt. Hier wurden im Zuge der Entwicklung der Verdunstungsmessung im Labor [SC11] Temperatur-Luftfeuchtesensoren (Typ „Humicap HMP45A“ der Firma Vaisala Qyi, mit einem Messbereich der relativen Luftfeuchte φ_{rel} von 0,8 bis 100 % und einer Genauigkeit von $\pm 2 \%$ und einem Messbereich der Lufttemperatur ϑ_{air} von $-39,2$ bis $+60^\circ\text{C}$ und einer Genauigkeit von $\pm 0,2^\circ\text{C}$) des selben Durchmessers eingeführt. Beide Sensoren sind mit einem Datenlogger (Typ „Zeno 3200“ der Firma Coastal), verbunden.

Die Ergebnisse werden jede Minute ausgelesen und gespeichert. Mit dem in Abbildung 1 gezeigten Messaufbau kann die Verdunstung von einer nassen Probe erzeugt, abgeführt und erfasst werden.

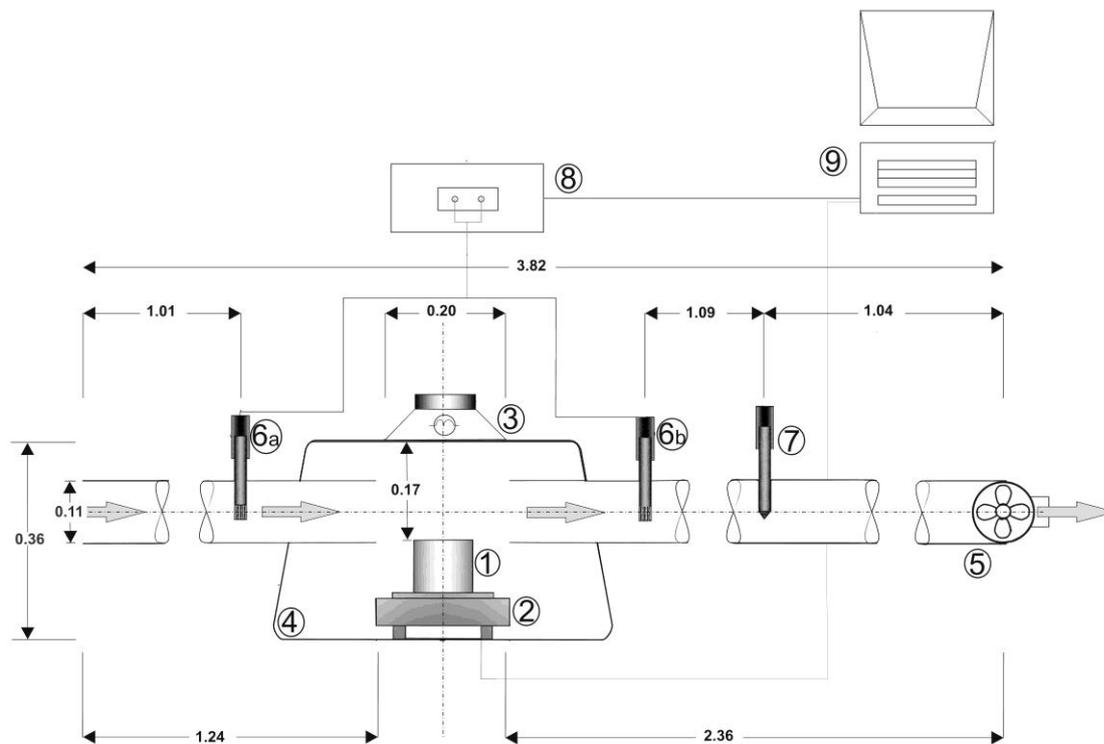


Abbildung 37: Schematische Darstellung des Laborverdunstungsversuchs (LEMD). Alle Abmessungen sind in m angegeben; Die bewässerte Probe (1) befindet sich in der Verdunstungszelle (4) auf der Waage (2) und wird von der Rotlichtlampe (3) erwärmt. Der Wasserdampf wird über den Luftstrom abgeführt (erzeugt von einem Ventilator (5) und überprüft mit einem Hitzedraht-Anemometer (7)). Der Masseverlust wird von der Waage gemessen und über den Computer (9) gespeichert. Zusätzlich wird ein Wasserdampfgradient vom Lufteinlass (Sensor 6a) und dem Luftauslass (Sensor 6b) gemessen und mit einem Datenlogger (8) gespeichert [SC11].

Eine Verdunstung wird erzeugt, indem eine bewässerte Probe (oberflächenmaterial) direkt unterhalb der Rotlichtlampe platziert wird. Die von der Probenoberfläche absorbierte Energie bewirkt einen Dampfdruckgradienten von der bewässerten Probe zur Luft. Verdunstung findet solange statt, bis dieser Gradient ausgeglichen ist, oder kein Wasser in der Probe mehr vorhanden ist. Ein kompletter Ausgleich des Gradienten kann nur durch Aufsättigen der Luft erreicht werden. Diese Aufsättigung wird durch die Lüfter garantiert. Somit wird konstant trockene Raumluft nachgeliefert und die mit Wasserdampf angereicherte Luft wird zum Lüfter hin abgeführt. Die Luft streicht daher auch direkt über die Probenoberfläche. Dieser Aufbau ist daher für Proben mit einer maximalen Höhe von 0,12 m konfiguriert. Durch Platzhalter auf der Waage können Proben geringerer Höhe auf 0,12 m erhöht und damit gemessen werden.

Die Verdunstungsmessung erfolgt über die Messung des Masseverlustes über die Zeit durch die Waage. Vor dem Start einer Messung muss dafür die Verdunstungs-

zelle auf 45°C vorgeheizt sein, um Messfehler durch Temperaturänderungen auszuschließen. Während der Messung befindet sich die gewässerte Probe (ebenfalls 45°C warm und gewässert mit 45°C warmen Wasser) auf der Waage. Jede Minute wird das aktuelle Gewicht der Probe ermittelt. Der Masseverlust entspricht der Verdunstung.

Der Massenfluss kann in die Verdunstungsrate umgerechnet werden. In Verbindung mit der Größe der Probenoberfläche A_{Probe} kann der Massenfluss pro Zeit und Fläche berechnet werden. Um den Massenstrom in einen Volumenstrom (wie üblicherweise in der Meteorologie verwendet) umzurechnen, muss die Dichte des Wassers berücksichtigt werden. Mit Gleichung 19 kann die Verdunstungsraten in $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ errechnet und in die übliche meteorologische Einheit mm/h umgewandelt werden:

$$ET_{\text{Lab}} = \frac{\dot{m}_{\text{labET}}}{A_{\text{Probe}} \cdot \rho_{\text{W}}} \quad \text{Gl. 20}$$

Setzt man die gegebenen Werte dieses Versuchsaufbaus in Gleichung 20 ein ($A_{\text{Probe}} = 7,85398 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, $\rho_{\text{W}} = 0,99021 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$ bei Wassertemperatur von 45°C) kann der Masseverlust errechnet werden. Der Masseverlust von 1 g Wasser in 10 Minuten entspricht in dieser Versuchsanordnung einer Verdunstung von 0,756 mm/h.

Bei den Proben handelt es sich um Bohrkern der entwickelten Prototypen mit einem Durchmesser von 0,1 m (entspricht einer Fläche von $7,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$) und einer einheitlichen Höhe von 0,08 m. Um vergleichbare und nachvollziehbare Ergebnisse liefern zu können, wurde die Verdunstungszelle, die Probe und auch das Wasser zum Bewässern der Probe auf 45°C vorgeheizt. Diese konstanten Temperaturbedingungen sind zur Vermeidung von Wäagefehlern der temperatursensitiven Waage unbedingt einzuhalten.

Die 45°C warme Probe wird dem Trockenschrank entnommen und unten und seitlich mit Frischhaltefolie abgedichtet. Diese wird mit Paketklebeband direkt unterhalb der Probenoberfläche fixiert um ein Auslaufen des Wassers aus der Probe zu verhindern. Damit ist zudem eine Verdunstung von den Seiten der Probe unterbunden. Verdunstung kann so nur noch an der Probenoberseite stattfinden. Die eingewickelte Probe wird gewogen und mit 20 g 45°C warmen Wassers auf der Oberfläche gleichmäßig benetzt. Die Bewässerung wurde mit einer medizinischen Plastik-Spritze (20 ml) durchgeführt.

Bei undurchlässigen Proben ist die Benetzbarkeit der Oberfläche überschritten und das Wasser fließt seitlich über den Probenrand hinaus. Daher wurden undurchlässige Proben, wie im Gelände üblich auch eingebaut, mit einer Neigung von 2 bis 2,5% aufgestellt. Das überschüssige Wasser kann so bei allen Proben identisch abfließen. Die bewässerte Probe wird erneut gewogen. Anschließend wird die Rotlichtlampe von der Verdunstungszelle genommen und die Probe kann so einfach auf die Waage in der Verdunstungszelle gestellt werden.

Die Waage mit der präparierten Probe wird tariert. Im Folgenden wird die Rotlichtlampe wieder auf die Öffnung gestellt, die Verdunstungszelle somit wieder geschlossen und die Verdunstung wird gestartet. Die Datenaufzeichnung des Daten-Loggers und des Computers wird direkt darauffolgend zeitgleich gestartet. Ein Messzyklus

dauert 7,5 h. Nach den 7,5 h wird die Probe aus der Verdunstungszelle herausgenommen und erneut gewogen, um den gesamten Masseverlust der Wägung Δm zu kontrollieren. Für jeden Prototypen wurden anhand von 3 Steinen mindestens je 3 Messungen durchgeführt. Insgesamt wurden zusammen mit den Lockermaterialien 450 Einzelmessungen durchgeführt.

Bei den Prototypen R und S sind weniger Messungen vorhanden (deshalb in Abbildung 38 nicht mit dargestellt), da nur ein Stein existierte. Der Prototyp R mit den 2 mm kleineren Glaskugeln zeigt ein Mittelwert von 7,25 g/7,5 h; der Prototyp S mit den 3 mm größeren Glaskugeln zeigt ein Mittelwert von 5,76 g/7,5 h.

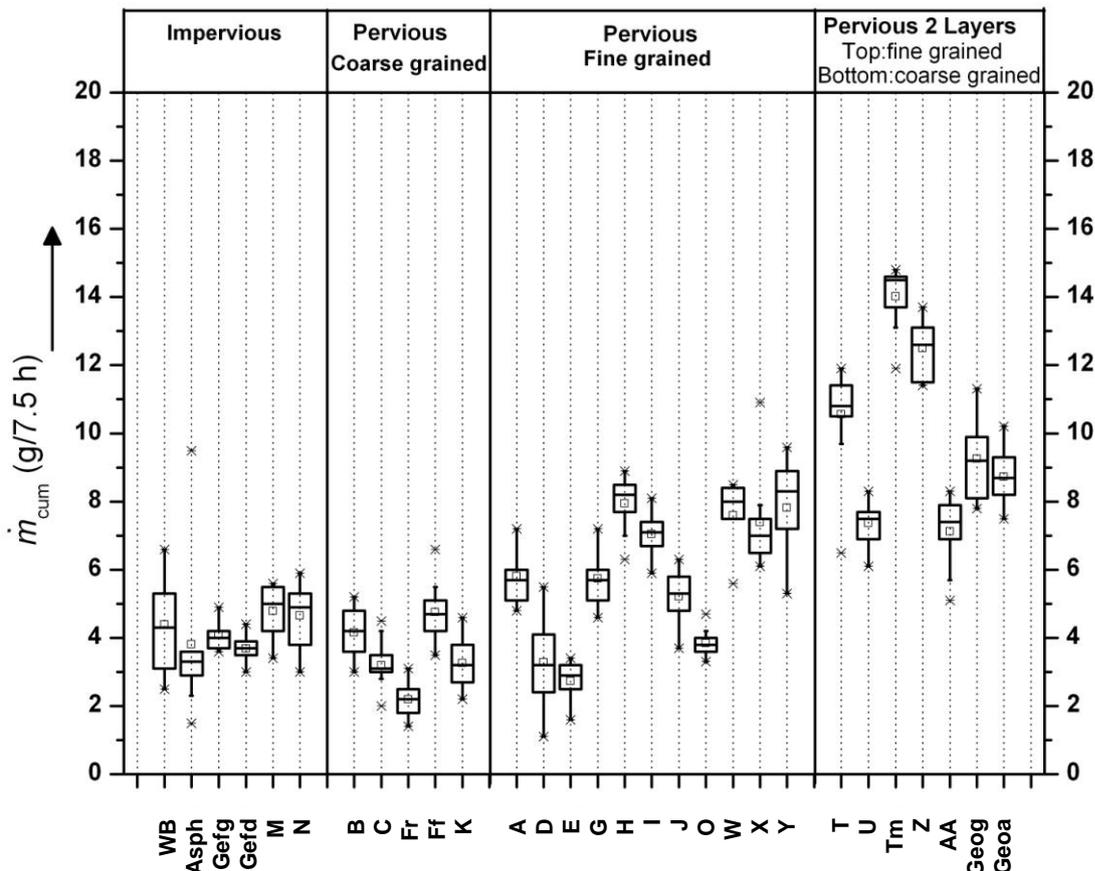


Abbildung 38: Ergebnisse der Laborverdunstungsmessung der entwickelten Prototypen .

Die Ergebnisse (Anhang 2.11) zeigen sehr große Variationen der Verdunstungswerte zwischen 2,1 g/7,5 h und 14,1 g/7,5 h (Abbildung 38). Die gefügedichten wasserundurchlässigen Prototypen zeigen mit durchschnittlich 4 g/7,5 h geringe, aber nicht die geringsten Laborverdunstungswerte an. Die grobkörnigen wasserundurchlässigen Prototypen zeigen ähnlich geringe Laborverdunstungswerte an. Bei den feinkörnigen wasserundurchlässigen Prototypen gibt es starke Variationen; einige Prototypen zeigen 8 g/7,5 h an, wohingegen andere bei 3 g/7,5 h liegen. Die zweischichtigen Prototypen zeigen generell die höchsten Laborverdunstungswerte zwischen 7 g/7,5 h und 14 g/7,5 h an.

Der Prototyp V mit offenerporiger Vorsatzschicht und dichtem Kernbeton – ist in der Abbildung 38 nicht enthalten - zeigt mit einem Mittelwert von 13,9 g/7,5 h (Median:

14,3, Min: 11,8, Max: 14,7 für 9 Messungen) ebenso hohe Werte an wie der Prototyp Tm. Dieser Prototyp wurde als letztes entwickelt und konnte beim Geländeversuch nicht mehr mit berücksichtigt werden.

Der auf der großen Werksmaschine produzierte schwarze Prototyp Tm zeigt mit ca. 14 g/7,5 h gegenüber dem auf der Labormaschine entwickelten graue Prototyp T mit 11 g/7,5 h eine höhere Verdunstung an. Ein Vergleich der geohydraulischen Eigenschaften der beiden Prototypen ergab, dass bei nahezu gleichen Durchlässigkeitsbeiwerten das Wasseraufnahmevermögen mit $w_{WAV} = 26,6 \% \text{ } 1,1 \% \text{ größer}$ und das Wasserhaltevermögen mit $w_{WHV} = 5,4 \% \text{ } 1,4\% \text{ geringer}$ ist. Die maximale Rauigkeit und die Benetzung sind gleich.

Die beiden handelsüblichen wasserdurchlässigen Proben KP (6,36 g/7,5 h) und An (3,16 g/7,5 h) erreichen nicht annähernd das Verdunstungsniveau der eigens entwickelten zweischichtigen Prototypen, obwohl beide ebenfalls zweischichtig aufgebaut waren. Die weiteren wasserundurchlässigen Proben Straßenasphalt (Asph: 2,69 g/7,5 h), Straßenbeton (Bnrw: 2,13 g/7,5 h) und wasserundurchlässige Gehwegplatte (WB: 4,22 g/7,5 h) gehören zu den Belägen mit geringem Verdunstungspotential. Dem gegenüber zeigen der natürliche Boden (Boden: 14,73 g/7,5 h) und der grasbewachsene Boden (Gras: 29,50 g/7,5 h) im Labor eine 1,6 bzw. 3,3 fach höhere Verdunstung [P10].

Eine Übertragung der Ergebnisse der Laborverdunstungsmessung ins Gelände ist insoweit möglich, als dass die Laborverdunstungsmessung ein typisches Verdunstungsverhalten nach einem sommerlichen Regenereignis simuliert. Dieses Verhalten ist charakterisiert durch kurzfristige sehr hohe Verdunstungsraten direkt nach dem Regenereignis bedingt durch den benetzenden Wasserfilm und die wasseraufgefüllten Mulden an der Oberfläche. Daran schließt sich die Abtrocknungsphase mit sinkenden Verdunstungsraten an. Haufwerksporige Betonsteine zeigen generell verzögerte und geringere Verdunstungsraten an. Wenn die Oberfläche der Betonsteine abgetrocknet ist nähert sich die Verdunstungsrate Null an. Hier zeigen haufwerksporige Betonsteine noch recht lange sehr geringe Verdunstungsraten an.

3.2.13 Korrelationsanalyse

Mit einer Korrelationsanalyse lässt sich ermitteln, ob ein Zusammenhang zwischen zwei Variablen besteht. Dabei zeigt der Korrelationskoeffizient r an, ob eine Beziehung zwischen zwei Merkmalen besteht und wie stark diese ist. Ein Korrelationskoeffizient von $r = 1$ bedeutet, dass ein perfekter Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen besteht, während ein Korrelationskoeffizient $r = -1$ bedeutet, dass die beiden Merkmale absolut gegenläufig sind [S10]. Ist der Korrelationskoeffizient $r = 0$ sind die zwei Merkmale absolut unabhängig voneinander. In Microsoft Excel lassen sich die Korrelationskoeffizienten zwischen jeweils zwei Merkmalen durch die entsprechende Tabellenfunktion mit dem Syntax `KORREL(Matrix1; Matrix2)` berechnen. Um herauszufinden, welche Merkmale miteinander korrelieren, wurden alle zuvor ermittelten Eigenschaften und Kenngrößen der wasserdurchlässigen Pflastersteine untereinander korreliert und eine Korrelationsmatrix erstellt, in der die Korrelationskoeffizienten eingetragen sind [R11].

Die Verdunstung korreliert mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = -0,73$ relativ gut mit der Benetzung. Je höher die Benetzungsklasse, also je weniger der Stein benetzt, desto höher ist der Wert für die Verdunstung. Die Korrelation zwischen der Verdunstung und der Einteilung der Prototypen in Gruppen ist mit einem Wert von $r = 0,7$ ebenfalls recht gut. Mit ansteigender Gruppennummer nimmt die Verdunstungsrate zu. Dabei sind die Gruppen wie folgt eingeteilt [R11]:

- Gruppe 1: wasserundurchlässige Prototypen
- Gruppe 2: wasserdurchlässige grobkörnige Prototypen
- Gruppe 3: wasserdurchlässige feinkörnige Prototypen
- Gruppe 4: zweischichtige wasserdurchlässige Prototypen

Die zweischichtigen Pflastersteine zeigen also die höchsten und die wasserundurchlässigen Pflastersteine die geringsten Verdunstungsraten. Korrelationen im mittleren Bereich zeigt die Verdunstung mit der Rauigkeit R_{\max} ($r = -0,45$), der Schichtigkeit ($r = 0,48$) und den verschiedenen KorngröÙeneinteilungen ($r = -0,53$ bis $-0,44$). Bei einer geringeren maximalen Rauigkeit R_{\max} und kleineren Korngrößen steigt die Verdunstungsrate also an. Wie schon durch die Gruppeneinteilung gezeigt, haben die Pflastersteine höhere Verdunstungsraten, wenn sie aus zwei verschiedenen Schichten bestehen [R11].

Die Durchlässigkeitsbeiwerte zeigen gute Korrelationen mit dem Wasseraufnahmevermögen w_a ($r = 0,73$), dem Porenvolumen V_{Poren} ($r = 0,8$) und der Schichtigkeit ($r = -0,75$). Je höher also das Wasseraufnahmevermögen w_a und das Porenvolumen V_{Poren} sind, desto höher sind auch die Verdunstungsraten. Während die Verdunstung positiv durch die Zweischichtigkeit der Steine beeinflusst wird, wird die Wasserdurchlässigkeit negativ von ihr beeinflusst. Das kann daran liegen, dass bei einer geringeren Durchlässigkeit weniger Wasser durch den Stein hindurch fließen kann, somit im Stein gespeichert wird und der Verdunstung zur Verfügung steht. Der Durchlässigkeitsbeiwert und die Verdunstungsrate korrelieren jedoch nicht direkt miteinander. Die Wasserdurchlässigkeit zeigt außerdem mittlere positive Korrelationen mit dem Wasserhaltevermögen w_{WHV} ($r = 0,53$) und der Kapillarität ($r = 0,45$) [R11].

Das Wasseraufnahmevermögen w_{WAV} korreliert stark positiv mit dem Wasserhaltevermögen w_{WHV} ($r = 0,8$) und dem Porenvolumen V_{Poren} ($r = 0,85$). Je größer das Porenvolumen eines Steines, desto mehr Wasser kann er aufnehmen und je mehr Wasser er aufnehmen kann, desto mehr kann er gegen die Schwerkraft halten. Außerdem besteht eine recht hohe negative Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = -0,76$ zwischen dem Wasseraufnahmevermögen w_{WAV} und der Schichtigkeit. Ein einschichtiger Pflasterstein nimmt demnach mehr Wasser auf als ein zweischichtiger [R11].

Wie das Wasseraufnahmevermögen w_{WAV} ist auch das Wasserhaltevermögen w_{WHV} stark von dem Porenvolumen V_{Poren} eines Steines abhängig. Der Korrelationskoeffizient ist positiv und liegt bei $r = 0,76$. Außerdem korreliert das Wasserhaltevermögen w_{WHV} mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,53$ positiv mit der Kapillarität h_K und negativ mit der volumenbezogenen Wärmekapazität c_p im trockenen Zustand ($r = -0,4$) und der Schichtigkeit ($r = -0,48$) [R11].

Für das Porenvolumen V_{Poren} ergeben sich nur Korrelationen im mittleren Bereich. Es korreliert positiv mit der Kapillarität K ($r = 0,53$) und dem Porengehalt vom Rohgehalt ($r = 0,41$) der einzelnen Pflastersteine. Je größer das Porenvolumen, umso mehr Wasser kann durch Kapillarkräfte von dem Stein aufgenommen werden und je größer der Porengehalt des Rohmaterials, das zur Herstellung des Steines verwendet wird, desto größer ist auch das Porenvolumen des gefertigten Pflastersteines. Außerdem ergeben sich für das Porenvolumen mittlere, negative Korrelationen mit der Wärmeleitfähigkeit λ im trockenen Zustand ($r = -0,53$), der volumenbezogenen Wärmekapazität c_p im trockenen ($r = -0,57$) und im feuchten ($r = -0,42$) Zustand, der Temperaturleitfähigkeit a im feuchten Zustand ($r = -0,47$) und der Schichtigkeit ($r = -0,65$) [R11].

Die Benetzung korreliert mit Korrelationskoeffizienten von $r = 0,74$ und $r = 0,69$ recht gut mit der Korngröße eines Pflastersteines. Je größer die maximale Korngröße und die Differenz zwischen den einzelnen Körnern, desto höher ist die Benetzungsklasse und demzufolge die Benetzung umso schlechter. Außerdem korreliert die Benetzung mit der maximalen Rauigkeit R_{max} ($r = 0,67$), der Kapillarität K ($r = -0,57$), der Kornform ($r = 0,44$) und der Gruppenangehörigkeit der einzelnen Steine ($r = -0,52$) (Abbildung 39) [R11].

Die maximale Rauigkeit R_{max} ist, wie unter Punkt 4.2 beschrieben, stark von der maximalen Korngröße abhängig, so dass sich hier sehr gute Korrelationen mit Koeffizienten von $r = 0,95$ (maximale Korngröße), $r = 0,97$ (mittlere Korngröße) und $r = 0,83$ (Korngrößendifferenz) ergeben. Die minimale Korngröße korreliert negativ mit R_{max} ($r = -0,44$), da R_{max} mit kleinerer Korngröße abnimmt [R11].

Zwischen der Kapillarität K und dem Zement besteht eine mittlere, positive Korrelation ($r = 0,41$). Durch den Zement wird das Wasser zwischen den Körnern hochgezogen, so dass die Kapillarität von diesem abhängig ist. Außerdem korreliert die Kapillarität im mittleren Bereich negativ mit der Kornform ($r = -0,54$), der maximalen Korngröße ($r = -0,47$), der mittleren Korngröße ($r = -0,43$) und der Korngrößendifferenz ($r = -0,46$). Weiterhin besteht eine geringe negative Korrelation mit der volumenbezogenen Wärmekapazität c_p im trockenen Zustand ($r = -0,43$) [R11].

Die thermischen Eigenschaften der Pflastersteine in den drei unterschiedlichen Szenarien zeigen untereinander mittlere bis sehr gute, positive Korrelationen mit Korrelationskoeffizienten zwischen $r = 0,42$ und $r = 0,99$ (Abbildung 39). Außerdem korrelieren sie im mittleren bis hohen Bereich mit dem Porengehalt vom Rohgehalt ($r = -0,55$ bis $r = -0,73$) und dem Kornmaterial ($r = -0,48$ bis $r = -0,69$) der Steine. Je größer demnach der Porengehalt, desto schlechter sind die Werte für die Wärmeleitfähigkeit λ , die volumenbezogene Wärmekapazität c_p und die Temperaturleitfähigkeit a [R11].

Der Wasserzementwert korreliert positiv mit dem Porengehalt vom Rohgehalt ($r = 0,68$) und negativ mit der minimalen Korngröße ($r = -0,42$). So nimmt der Wasserzementwert mit abnehmender Korngröße zu [R11].

Die verschiedenen Korngrößeneinteilungen zeigen untereinander mittlere bis hohe Korrelationen (Abbildung 39) [R11].

3.2.14 Statistische Untersuchung

Da die ermittelten Kenngrößen sowie auch die Eigenschaften der Prototypen nicht unabhängig voneinander sind und gegenseitige Wechselwirkungen zwischen ihnen bestehen, ist die Durchführung einer multivariaten Statistik hier nicht sinnvoll. Stattdessen wurde anhand von linearen Modellen überprüft, welche Faktoren sich gegenseitig beeinflussen.

Für die Visualisierung der funktionalen Zusammenhänge wurde die Labor-Verdunstung ET_{lab} als höchstrangige Variable gegen jede der ermittelten Kenngrößen und Eigenschaften geplottet, um evtl. bestehende Zusammenhänge sichtbar zu machen, die dann als Hypothesen und somit als Modellgrundlagen formuliert wurden. Neben Haupthypothesen (H), die die direkte Abhängigkeit der Verdunstung von den verschiedenen Kenngrößen und Eigenschaften beschreiben, wurden auch Nebenhypothesen (N) aufgestellt. Diese beschreiben, von welchen untergeordneten Faktoren die Kenngrößen/Eigenschaften abhängig sind und somit die Verdunstung indirekt beeinflussen.

Die Haupthypothesen wurden mit verschiedenen statistischen Modellen beschrieben, die mit Hilfe des unter Kapitel 3.2.14.3 beschriebenen Informationskriteriums nach Akaike ausgewählt und deren Güte anhand des Bestimmtheitsmaßes R^2 und der Irrtumswahrscheinlichkeit p beschrieben wurde [R11].

3.2.14.1 ANOVA

Die Varianzanalyse (Analysis of Variance, ANOVA) ist ein Verfahren, mit dem sich die Wirkung einer oder mehrerer Faktoren auf eine Zielvariable ermitteln lässt [B08]. Es werden Varianzen und Prüfgrößen berechnet, um Aufschluss über die in den Daten verborgenen Gesetzmäßigkeiten zu erlangen. Die ANOVA als varianzanalytisches Verfahren setzt eine Normalverteilung der Residuen voraus. Wird diese durch algebraische Transformation der Zielvariablen nicht zufriedenstellend erreicht, müssen parameterfreie Alternativmethoden basierend auf Rangsummen (Kruskal-Wallis-Test, Kap. 3.2.14.4) oder Permutation (pANOVA, Kap. 3.2.14.5) verwendet werden. Bei einer Mehrweg-ANOVA ist zu beachten, dass die Variable auf allen Faktorstufen balanciert verteilt ist. Da dies bei den hier vorliegenden Daten nicht der Fall ist und Interaktionen zwischen den Faktoren untergeordnet wurden, wurde eine Mehrweg-ANOVA vom Modelltyp 2 gewählt, der außerdem einen geringeren β -Fehler aufweist, als der häufiger verwendete Modelltyp 3 [L03]. Neben der Irrtumswahrscheinlichkeit p werden in der ANOVA auch die unter Kapitel 3.2.14.2 beschriebenen Quadratsummenanteile als Gütemaß angegeben [R11].

3.2.14.2 Quadratsumme

Die Summe der quadratischen Abweichungen (Residual Sum of Squares, RSS) beschreibt die quadratischen Abweichungen der durch das statistische Modell beschriebenen (erwarteten) Werte x_m von den gemessenen (beobachteten) Ist-Werten x_i (Abbildung 40). Je besser ein Modell die Beziehung zwischen abhängigen und

unabhängigen Variablen beschreibt, umso geringer ist der Anteil der RSS an den Gesamt-Quadratsummen (Total Sum of Squares, TSS) [R11].

$$TSS = \sum_0^i (x_m - x_i)^2 \quad \text{Gl. 21}$$

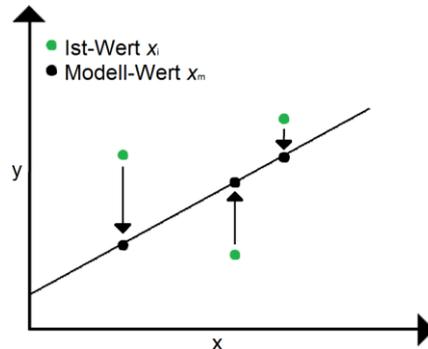


Abbildung 40: Gemessene Ist-Werte x_i und deren dazugehörigen z.B. auf einer Geraden liegenden Modell-Werte x_m .

3.2.14.3 Informationskriterium nach Akaike

Mit Hilfe des Informationskriteriums nach Akaike (Akaike Information Criterion, AIC) können unterschiedliche Modelle für einen gleichen Datensatz miteinander verglichen und so das am besten geeignete Modell ausgewählt werden. In die Beurteilung gehen die Anpassungsgüte des geschätzten Modells an die vorliegenden Daten als aufwertendes Kriterium und die Komplexität des Modells, gemessen an der Anzahl der verwendeten Parameter, als abwertendes Kriterium ein. Demzufolge wird eine Überanpassung des Modells an den Datensatz (durch eine hohe Anzahl von Parametern, die nur der reinen Modellanpassung, aber nicht einer wirklichkeitsnahen Erklärung dienen) „bestraft“. Bevorzugt wird das Modell mit dem kleinsten AIC-Wert [F09] [R11].

3.2.14.4 Kruskal-Wallis-Test

Der Kruskal-Wallis-Test (KW-Test) ist ein verteilungsunabhängiger Rangsummentest und die klassische Alternative zu einer einfaktoriellen ANOVA. Messwerte werden in Ränge eingeteilt und haben somit den gleichen Abstand voneinander [E08]. Dieser Test wird angewendet, wenn Messwerte trotz Transformation weit von einer Normalverteilung abweichen [R11].

3.2.14.5 Permutations-ANOVA (pANOVA)

Dieses Verfahren ist wie der KW-Test verteilungsunabhängig und eine moderne Alternative zur ein- und mehrfaktoriellen ANOVA. Es basiert auf rechenintensiver Permutationstechnik und hat eine höhere Aussagekraft (kleine Effekte werden besser detektiert) als der KW-Test. Allerdings liefert dieses Verfahren, wie alle permutati-

onsbasierten Tests nur bei einer größeren Anzahl von Beobachtungen eine verlässliche Fehlerabschätzung [R11].

3.2.14.6 Bestimmtheitsmaß

Das Bestimmtheitsmaß R^2 dient der Beschreibung der Stärke eines Zusammenhanges. Es gibt den Anteil an der Gesamtvarianz an, der durch ein Modell erklärt wird, also die Übereinstimmung von erwarteten mit beobachteten Werten. R^2 ist der Quotient aus dem erklärten Teil der Varianz (Var_{Modell}) und der Gesamtvarianz (Var_{ges}) und somit ein Maß für die Güte des Modells [B08].

$$R^2 = \frac{Var_{\text{Modell}}}{Var_{\text{ges}}} \quad \text{Gl. 22}$$

Die Werte für R^2 liegen zwischen 0 und 1. Ist $R^2 = 0$, ist keinerlei Anteil an der Gesamtvarianz erklärt, so dass, je nach Betrachtung, entweder kein Zusammenhang zwischen den untersuchten Merkmalen besteht oder das Modell keinen Erklärungswert hat. Ist $R^2 = 1$ bedeutet dies, dass ein vollständiger Zusammenhang zwischen den Merkmalen besteht und sich die Variation des einen Merkmals vollständig durch die Variation des anderen Merkmals, bzw. das Modell erklären lässt [K99]. So sind beispielsweise bei $R^2 = 0,956$ insgesamt 95,6 % der Werte statistisch erklärt [R11].

3.2.14.7 Irrtumswahrscheinlichkeit

Bei allen statistischen Tests ist eine Wahrscheinlichkeit anzugeben, die das Vertrauen in die Verlässlichkeit des Testergebnisses ausdrückt [B08]. Sie gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der die Null-Hypothese (d.h. die Annahme, dass kein positives Ergebnis vorliegt) fälschlicherweise abgelehnt wird, obwohl sie zutrifft (d.h. es wird ein positives Ergebnis angenommen, obwohl keines oder ein Ergebnis in nicht ausreichendem Maße vorliegt). Je kleiner also die Irrtumswahrscheinlichkeit, d.h. das Signifikanzniveau, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass das damit bezeichnete Ergebnis nicht falsch ist [BÜ08]. Eine weithin übliche Einteilung der Irrtumswahrscheinlichkeiten ist in Tabelle 14 wiedergegeben [R11].

Tabelle 14: Einteilung der Irrtumswahrscheinlichkeiten [BÜ08].

Irrtumswahrscheinlichkeit p	Bedeutung
$p > 0,05$	nicht signifikant
$p \leq 0,05$	signifikant
$p \leq 0,01$	sehr signifikant
$p \leq 0,001$	höchst signifikant

3.2.14.8 Ergebnisse der statistischen Untersuchung

Wie bereits unter Kapitel 3.2.5 gezeigt, hängt die Labor-Verdunstung ET_{lab} eines Prototyps von seiner Benetzungsklasse ab. Je vollständiger die Benetzung des Steines, umso höher sind die Verdunstungsraten (Abbildung 41). Es kann also die Hypo-

these H_1 aufgestellt werden, dass die Labor-Verdunstung ET_{lab} von der Benetzungs-klasse abhängig ist [R11].

Da das Maß der Benetzung der Pflastersteine, wie unter Kapitel 3.2.5 beschrieben, stark von dem Zementgehalt an der Oberfläche abhängig ist, kann die Nebenhypothese N_1 aufgestellt werden, dass die Benetzungsklasse vom Zement abhängig ist [R11].

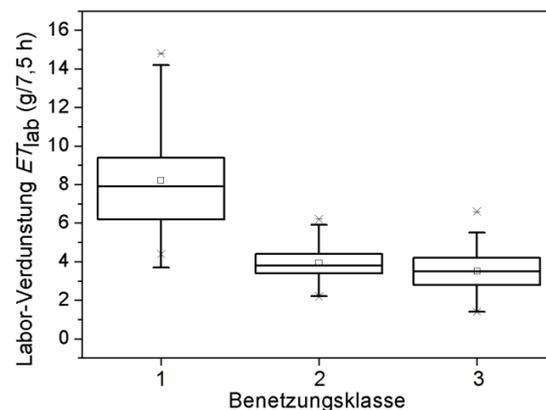


Abbildung 41: Abhängigkeit der Labor-Verdunstung ET_{lab} von der Benetzungs-klasse der Pflastersteine [R11].

Die Unterteilung der Prototypen nach ihrer maximalen Rauigkeit in die zwei Gruppen „nicht rau“ ($R_{max} < 4$ mm) und „rau“ ($R_{max} \geq 4$ mm), lässt erkennen, dass die Verdunstung auch von der maximalen Rauigkeit abhängig ist (H_2). Die Pflastersteine, die weniger rau sind, zeigen höhere Verdunstungsraten (Abbildung 42) [R11].

Da die maximale Rauigkeit R_{max} , wie unter Punkt 4.2 beschrieben, von der maximalen Korngröße abhängig ist, ergibt sich die Nebenhypothese N_2 , dass die maximale Rauigkeit von der Korngröße abhängig ist. Somit hat diese einen indirekten Einfluss auf die Verdunstung, auch wenn keine direkte Abhängigkeit der Verdunstung von der Korngröße zu erkennen ist [R11].

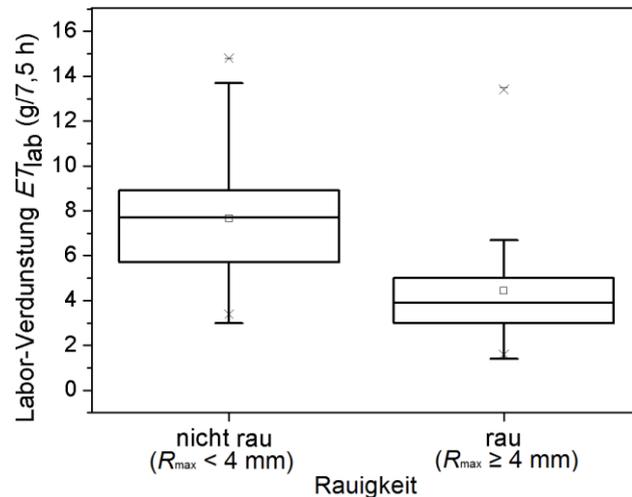


Abbildung 42: Abhängigkeit der Labor-Verdunstung ET_{lab} von der maximalen Rauigkeit R_{max} [R11].

Auch die Schichtigkeit der Pflastersteine zeigt einen Einfluss auf die Verdunstung (H_3). Die zweischichtigen Prototypen zeigen höhere Verdunstungsraten, als die einschichtigen (Abbildung 43) [R11].

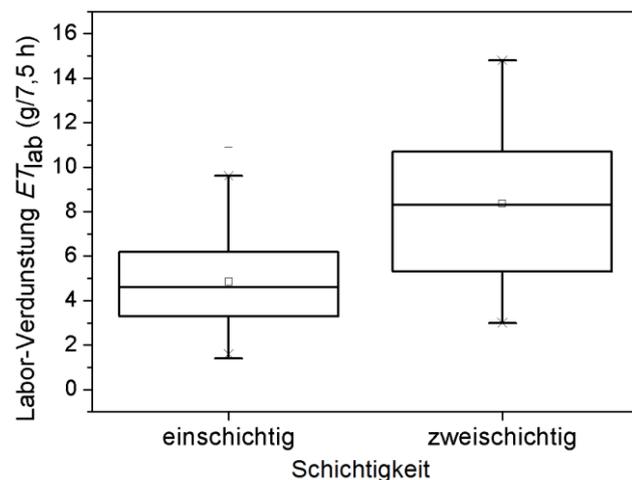


Abbildung 43: Abhängigkeit der Labor-Verdunstung ET_{lab} von der Schichtigkeit der Pflastersteine [R11].

Der Vergleich der Labor-Verdunstungsraten der grauen und der anthrazitfarbenen Pflastersteine zeigt, dass die Anthrazit farbenden Pflastersteine im Schnitt höhere Verdunstungsraten besitzen. Bei den grauen Pflastersteinen zeigen nur einzelne Steine höhere Verdunstungsraten (Abbildung 44). Die Verdunstung hängt also ebenfalls von der Farbe der Pflastersteine ab (H_4) [R11].

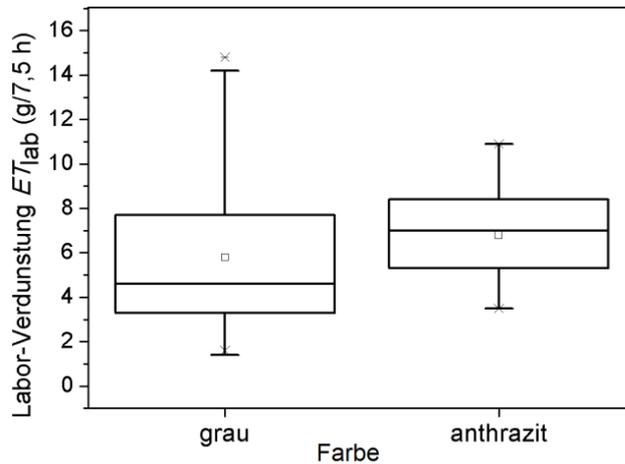


Abbildung 44: Abhängigkeit der Labor-Verdunstung ET_{lab} von der Farbe der Pflastersteine [R11].

Die Unterteilung der Prototypen in grobkörnige, feinkörnige, dichte (wasserundurchlässige) und zweischichtige Pflastersteine zeigt, dass die grobkörnigen Pflastersteine gefolgt von den dichten Pflastersteinen die geringsten Verdunstungsraten haben, während die Verdunstungsraten für die feinkörnigen Pflastersteine höher sind. Am höchsten sind die Verdunstungsraten für die zweischichtigen Pflastersteine (Abbildung 45). So besteht auch ein Zusammenhang zwischen der Verdunstungsrate der Steine und ihrer Gruppenzugehörigkeit (H_5) [R11].

Da die Gruppeneinteilung anhand der Korngröße (grob- oder feinkörnig), der Schichtigkeit (ein- oder zweischichtig) und der Wasserdurchlässigkeit (wasserdurchlässig oder wasserundurchlässig) erfolgt, können folgende drei Nebenhypothesen aufgestellt werden: Die Gruppeneinteilung ist von der Korngröße (N_4), der Schichtigkeit (N_5) und der Wasserdurchlässigkeit abhängig (N_6). Da die Wasserdurchlässigkeit wiederum vom Porenvolumen abhängig ist, kann eine weitere Nebenhypothese (N_7) aufgestellt werden [R11].

In Abbildung 46 sind die funktionalen Beziehungen zwischen Haupt- und Nebenhypothesen graphisch dargestellt.

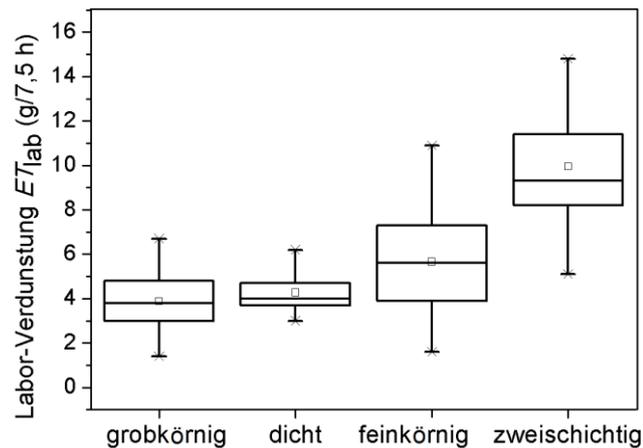


Abbildung 45: Abhängigkeit der Labor-Verdunstung ET_{lab} von der Gruppenzugehörigkeit der Pflastersteine [R11].

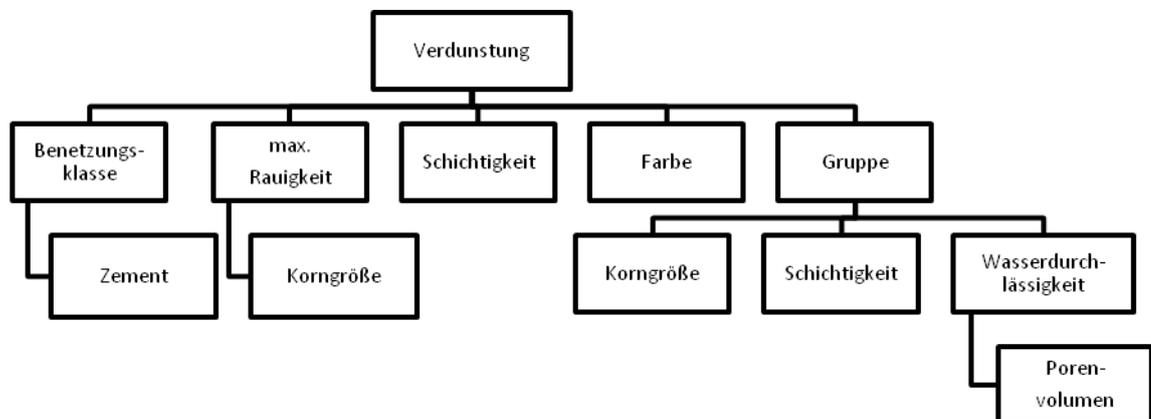


Abbildung 46: Graphische Darstellung der funktionalen Beziehungen zwischen Haupt- und Nebenhypothesen [R11].

Anhand der fünf Haupthypothesen

- H_1 : Die Verdunstung hängt von der Benetzungsklasse ab.
- H_2 : Die Verdunstung hängt von der max. Rauigkeit ab.
- H_3 : Die Verdunstung hängt von der Schichtigkeit ab.
- H_4 : Die Verdunstung hängt von der Farbe ab.
- H_5 : Die Verdunstung hängt von der Gruppe ab.

wurde ein Modell erstellt, mit dem der Einfluss der zwei Kenngrößen Benetzungsklasse und max. Rauigkeit, sowie der drei Eigenschaften Schichtigkeit, Farbe und Gruppe auf die Verdunstung hin überprüft werden kann. Außerdem wird in dem Modell geprüft, ob signifikante Interaktionen zwischen jeweils zwei dieser fünf Kenngrößen und Eigenschaften bestehen [R11].

Die Kenngrößen wurden zunächst mittels automatischer stufenweiser Selektion einer ANOVA vom Modelltyp I zugeführt. Die Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Benetzungsklasse ($p < 0,001$), die Schichtigkeit ($p < 0,02$) und die Gruppeneinteilung

($p < 0,04$) sind hier gering, so dass die Hypothesen H_1 , H_3 und H_5 angenommen werden können. Eine tendenzielle Interaktion besteht nach der ANOVA mit $p < 0,07$ nur zwischen der maximalen Rauigkeit und der Schichtigkeit. Jedoch ist nach [BÜ08] auch diese Interaktion nicht signifikant. Aufgrund des unbalancierten Designs wurde im nächsten Schritt eine ANOVA vom Modelltyp II durchgeführt, bei der das Ergebnis (im Gegensatz zum Modelltyp I) nicht von der Reihenfolge abhängt, in der die Faktoren in das Modell eingeladen werden. Demnach sind die Irrtumswahrscheinlichkeiten deutlich höher und lediglich die Schichtigkeit ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,05$ signifikant in Bezug auf die Labor-Verdunstung ET_{lab} [R11].

Im Vergleich der ANOVAs, einmal mit Interaktionen und einmal ohne, zeigt sich, dass es nicht lohnenswert ist die Interaktionen zwischen den einzelnen Einflussgrößen zu berücksichtigen, da bei einem Vergleich der beiden Modelle der AIC nicht signifikant verschieden ist. Für das Modell, in dem die Interaktionen einfließen, ist $AIC = 114,9$, für das Modell, in dem die Interaktionen nicht berücksichtigt werden, liegt der AIC bei 114,1. Daher werden im Folgenden nur die fünf Haupthypothesen getestet und nicht deren Interaktionen untereinander [R11].

Für die Hypothese H_1 ergibt sich, dass die Verdunstung mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,5$ von der Benetzung abhängt. 54 % der Varianz in den Daten kann also durch diesen Faktor statistisch erklärt werden. Die Irrtumswahrscheinlichkeit liegt nur bei $p < 0,001$ und ist somit nach [BÜ08] höchst signifikant. Mit einer Funktion von

$$\text{Verdunstung} = -2,53 \cdot \text{Benetzung} + 10,5$$

nimmt die Verdunstung pro Benetzungsklasse um -2,53 ab [R11].

Die Abhängigkeit der Verdunstung von der maximalen Rauigkeit (H_2) ist mit $p < 0,06$ nicht signifikant. Auch das Bestimmtheitsmaß ist mit $R^2 = 0,20$ sehr gering, so dass kaum eine Abhängigkeit zwischen der maximalen Rauigkeit und der Verdunstung besteht und die Hypothese H_2 abgelehnt werden sollte [R11].

Die trendmäßige Funktion wird angegeben mit:

$$\text{Verdunstung} = -0,43 \cdot \text{Rauigkeit} + 8,35$$

Das Modell nimmt also pro Rauigkeitsstufe tendenziell um -0,43 ab [R11].

Da bei den Eigenschaften Schichtigkeit, Farbe und Gruppe die Varianzen innerhalb der Faktorstufen sehr verschieden sind, wurden hier der Kruskal-Wallis-Test und die Permutations-ANOVA (pANOVA) angewendet, für die man jedoch nur die Irrtumswahrscheinlichkeit p und kein Bestimmtheitsmaß erhält [R11].

Für die Schichtigkeit ergibt sich nach dem Kruskal-Wallis-Test eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,03$, während die pANOVA eine noch geringere Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,02$ ergibt. Die Hypothese, dass die Verdunstungsrate durch die Ein- oder Zweischichtigkeit der Pflastersteine beeinflusst wird (H_3), kann also angenommen werden [R11].

Für die Farbe ist die Irrtumswahrscheinlichkeit, die durch die pANOVA berechnet wurde mit $p < 0,63$ wesentlich höher, als die durch den Kruskal-Wallis-Test berech-

nete Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,20$. Beide Irrtumswahrscheinlichkeiten sind nach [BÜ08] nicht signifikant, so dass die Hypothese, dass die Verdunstung von der Farbe der Pflastersteine abhängig ist (H_4), abgelehnt werden sollte. Die statistischen Tests wurden jedoch nur mit den im Labor gemessenen Verdunstungsraten durchgeführt, bei denen die höheren Werte der anthrazitfarbenen Pflastersteine hauptsächlich durch das für die Färbung der Pflastersteine verwendete Eisenoxid hervorgerufen werden. Durch den Eisenoxid-Gehalt können die anthrazitfarbenen Pflastersteine mehr Wärme absorbieren, als graue Pflastersteine gleicher Zusammensetzung, so dass die Verdunstungsraten höher ausfallen. Im Freien wird die Verdunstungsrate der dunklen Pflastersteine neben dem Eisenoxid-Gehalt zusätzlich durch die geringere Albedo, die ebenfalls zur Folge hat, dass die Steine mehr Wärme absorbieren, angehoben. Außerdem ist die Wärmestrahlung der Sonne, der die Pflastersteine draußen ausgesetzt sind, wesentlich stärker als die der im Labor verwendeten Wärmelampe. Die unter natürlichen Bedingungen durch die Wärmestrahlung der Sonne erzeugten Aufheiz- und Abkühlungsphasen der Pflastersteine bleiben bei der Messung im Labor aus, da sowohl die Steine, als auch das aufgegebene Wasser zuvor bei 45 °C im Trockenschrank erwärmt werden und der befeuchtete Stein direkt unter die Wärmelampe gestellt wird. Darüber hinaus laufen die Messungen im Labor nur über einen Zeitraum von 7,5 h, während die Messungen im Freien über mehrere Tage hinweg laufen. Das im Stein zwischengespeicherte Wasser, das nach 7,5 h noch verdunstet, wird bei der Messung im Labor also nicht berücksichtigt [R11].

Für die Gruppeneinteilung ergeben sich sehr geringe Irrtumswahrscheinlichkeiten von $p < 0,002$ (nach Kruskal-Wallis) und $p < 0,0005$ (pANOVA). Die Hypothese, dass die Verdunstung von der Gruppeneinteilung abhängig ist (H_5), kann also angenommen werden [R11].

4 Geländeversuche

4.1 Beschreibung der Untersuchungsfläche in Coesfeld

Die Auswahl einer geeigneten Untersuchungsfläche wurde anhand mehrerer Kriterien vorgenommen, welche für die Messkampagne notwendig, bzw. vorteilhaft sind. Die Untersuchungsfläche war von Münster (WWU betreute die Messungen) erreichbar, Mitarbeiter von HKB konnten jedoch täglich kontrollieren, ob Probleme bei den Messungen auftraten (z.B. Stromausfälle). Die Fläche konnte durch einen Bauzaun (später ersetzt durch einen fest installierten Zaun) gegen Vandalismus geschützt werden. Für die Infiltrationsmessungen, die Überflutungssimulation und die „clogging“-Effekte konnte, über einen Schlauch aus dem angrenzenden Musterpark, Wasser und Strom zur Verfügung gestellt werden. Auch musste genügend Platz vorhanden sein, da das geplante Messfeld ca. 8·8 m groß ist und aus Voruntersuchungen [GSC08] bekannt war, dass in unmittelbarer Umgebung zum Messfeld keine höheren Gegenstände wie Mauern, Hecken o. ä. sein dürfen. Daher sollte die Fläche insgesamt mehr als 20·20 m groß sein. Diese Mindestanforderungen wurden für eine brachliegende Fläche auf dem Firmengelände der HKB in Coesfeld festgestellt.

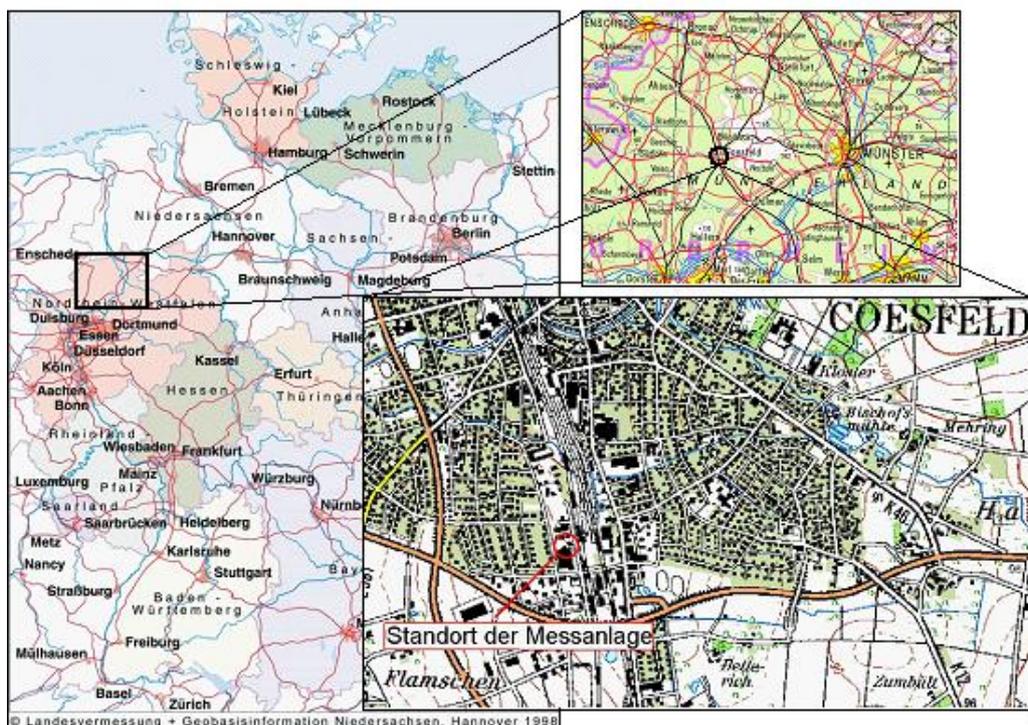


Abbildung 47: Geographische Lage der Untersuchungsfläche [S08].

4.1.1 Geographische Lage und naturräumliche Einordnung

Die Kreisstadt Coesfeld im Bundesland Nordrhein-Westfalen liegt ca. 35 km westlich der Stadt Münster (Abbildung 47). Naturräumlich betrachtet gehört Coesfeld zur Westfälischen Bucht, die ein Teil des nord-westdeutschen Tieflands ausmacht. Im Bereich von Coesfeld verläuft die Grenze zwischen den naturräumlichen Hauptein-

heiten Kernmünsterland und Westmünsterland. Coesfeld wird zum Westmünsterland, oder genauer zur Westmünsterländer Geest gezählt.

4.1.2 Klima

Die Stadt Coesfeld wird von einem gemäßigten atlantischen Klima geprägt. Die sich nach Westen und Nordwesten öffnende Westfälische Tieflandsbucht bewirkt, durch die vorherrschenden Südwestwinde, ein ganzjährig feuchtes Klima. Die Jahresniederschlagsraten liegen im langjährigen Mittel (1961-1990) bei 843 mm/a. Zwischen hydrologischem Winterhalbjahr (November – April) und hydrologischem Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) sind die Niederschlagsraten nahezu ausgeglichen. Die maximalen Niederschläge fallen im Sommer und im Winter mit je 200 bis 240 mm/Quartal (im langjährigen Mittel von 1961-1990). Im Februar und April sind die geringsten Niederschlagsmengen (50-60 mm/Monat im langjährigen Mittel von 1961-1990) zu verzeichnen. Dementsprechend sind die Niederschlagsraten im Frühling auch die niedrigsten (180-200 mm, im langjährigen Mittel von 1961-1990). Die hohen und über das Jahr verteilten Niederschläge⁴ führen zu einer hohen relativen Luftfeuchte, was sich in niedrigen Verdunstungsraten äußert. Der maritime Einfluss zieht ausgeglichene Jahrestemperaturen nach sich. Die klimatische Wasserbilanz ist im Sommer leicht negativ (-50 bis -100 mm im langjährigen Mittel 1960-1990), da die Verdunstung überwiegt. Im Winterhalbjahr ist die Niederschlagsrate höher als die Verdunstungsrate. Über das ganze Jahr verteilt ist die Wasserbilanz positiv [BMU05]. Die mittlere Jahresschwankung beträgt 16°C im langjährigen Mittel. Diese geringe Temperaturamplitude ist charakteristisch für Räume, welche von ozeanischen Einflüssen geprägt sind. Der wärmste Monat Juli weist im langjährigen Mittel eine Durchschnittstemperatur von 17-18°C auf. Die mittlere langjährige Temperatur des Januars liegt bei 1°C, damit ist der Januar der kälteste Monat eines Jahres [000]. Die meisten Sonnenstunden liegen in den Sommermonaten Juni – August mit etwa 175–200 h/Monat im langjährigen Mittel [BMU99].

4.2 Vorerkundung des Untergrundes der Untersuchungsfläche

4.2.1 Untersuchung des anstehenden Untergrundes

Der Oberbau der Untersuchungsfläche wurde nach der RSTO 01 [FGSV01] eingerichtet (siehe auch Kapitel 4.5.109). Insgesamt musste somit eine Oberbaumächtigkeit von 0,61 m bis 0,63 m in die Untersuchungsfläche eingebaut werden. Dafür wurde eine 11 m x 11 m große Grube (Abbildung 48, links) ausgehoben. Diese war an der Westseite 0,81 m tief und war nach Osten hin abgeschrägt (ca. 1% Gefälle), so dass hier eine Tiefe von 0,70 m erreicht wurde. Das ausgekofferte Material besteht komplett aus anthropogener Auffüllung, wie auch am Profil in Abbildung 48, rechts, erkennbar ist.

⁴ mittlere Zahl der Tage mit Niederschlägen > 1,0 mm liegt bei 130–140 Tagen pro Jahr



Abbildung 48: Vorerkundungen der Untersuchungsfläche in Coesfeld (links: Ansicht der Grube; rechts: Profilsicht der Grubenwand).

Eine historische Recherche, vor allem unter den älteren Mitarbeitern der HKB ergab, dass dieses Gelände ehemals von der Bundesbahn für Lokschuppen und Werkstätten genutzt wurde. Diese Gebäude wurden abgerissen und das Gelände von HKB übernommen. Kontaminiertes Erdreich wurde zunächst abgetragen und durch eine wasserundurchlässige Auffüllung mit hohem Tonanteil ersetzt. In diese Auffüllung wurde, Aussagen zur Folge, zudem noch Kalk untergekuttert, um eine Sickersperre zu erzeugen. Da sich die ausgehobene Grube direkt in dieser Auffüllung befindet und diese nicht komplett durchsticht, ist auch der Untergrund als nahezu wasserundurchlässig anzunehmen (Kapitel 4.2.3).

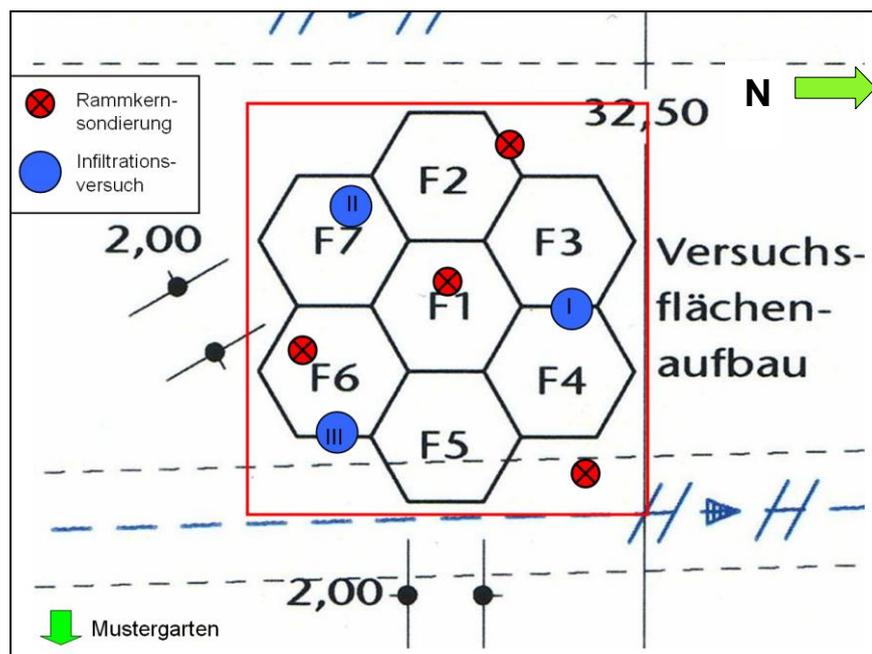


Abbildung 49: Lage der Rammkernsondierungen und Infiltrationsversuche auf der Untersuchungsfläche.

Für eine Abschätzung der Schichten unterhalb der Grube wurden daher 4 Rammkernsondierungen nach DIN 4021 durchgeführt. Dazu wurden 1,00 m lange Sonden mit einem Durchmesser von 36 mm mit Hilfe eines motorgetriebenen Hammers (Wacker-Hammer BH23) in das Erdreich gerammt. Um größere Tiefen zu erreichen, werden ein bis mehrere Verlängerungsstangen (ebenfalls je 1,00 m) auf die Sonde geschraubt. Diese Sonden wurden mit einem manuellen Ziehgerät aus dem Erdreich gezogen. Die entnommene Bodenprobe befindet sich in der Sonde. Mittels Bodenansprache wurden Schichtenverzeichnisse erstellt. Die Lage der Bohrpunkte ist in Abbildung 49 dargestellt.

Alle vier Sondierungen vom 09.04.2008 zeigten einen ähnlichen Aufbau des Untergrundes (Anhang 3.1). Die ursprünglich geplante Endteufe von 5 m unter der Grube konnte durch den hohen Tonanteil im Untergrund in keiner der Sondierungen erreicht werden. Die Endteufe betrug 1,40 m bis 1,80 m unter Grubensohle (ca. 2,10 m bis 2,50 m unter Geländeoberkante). Die oberste Schicht mit einer Mächtigkeit von 0,60 m bis 0,90 m besteht aus einer sehr heterogen aufgebauten erdfeuchten Auffüllung (grauer und schwerer Mittelsand bis Grobsand, Grobkies und Steine, z.T. stark schluffig). Darunter befindet sich 0,25 m bis 0,55 m mächtiger grau-roter, weicher, erdfeuchter feinsandiger Ton bis Schluff, der als wasserundurchlässige und zeitweise wasserstauende Verwitterungsschicht der unterlagernden Schicht anzusprechen ist (Kap. 4.2.3). Bis zur Endteufe ist jeweils ein rot-grauer, bröckeliger, erdfeuchter Ton bis Schluff mit wechselnden Feinsand- und Grobkies-Anteilen anzutreffen. Eine genaue Bestimmung der prozentualen Verteilung der Korngrößen der einzelnen Schichten (Korngrößenverteilung) wurde aufgrund der angetroffenen Heterogenität nicht durchgeführt, da diese wenig aussagekräftig hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit sind.



Abbildung 50: Bohrkerns aus der Rammkernsondierung.

4.2.2 Ermittlung des Flurabstandes

Der Flurabstand der untersten Schicht des Oberbaus muss mindestens 1 m betragen [FGSV98]. Anhand der oben beschriebenen vier Rammkernsondierung konnte der Flurabstand mit > 1 m bestätigt werden. Alle bei den Rammkernsondierungen beprobten Schichten waren erdfeucht. Der exakte Flurabstand konnte daher nicht ermittelt werden, da bei allen 4 Rammkernsondierungen die gesättigte Zone nicht

erreicht wurde. Die maximal erreichte Endteufe liegt bei 1,80 m unter der Sohle des Oberbaus (RKS 2). Daher kann auch der Flurabstand mit $> 1,80$ m angegeben werden. Der Bau von wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen ist nach diesem Kriterium somit erlaubt.

4.2.3 Ermittlung der Infiltrationsrate des anstehenden Untergrundes

Die flächenbezogenen Infiltrationsraten des anstehenden Untergrundes sind entscheidend für den Bau von wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen und müssen mindestens $540 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ betragen [BDB96]. Dazu wurden am 04.04.2008 drei Versuche mit dem Doppelringinfiltrometer (DRI) mit instationärem Druckgefälle auf der Sohle des Oberbaus durchgeführt. Die Lage der Infiltrationsversuche ist auf Abbildung 49 erkennbar.

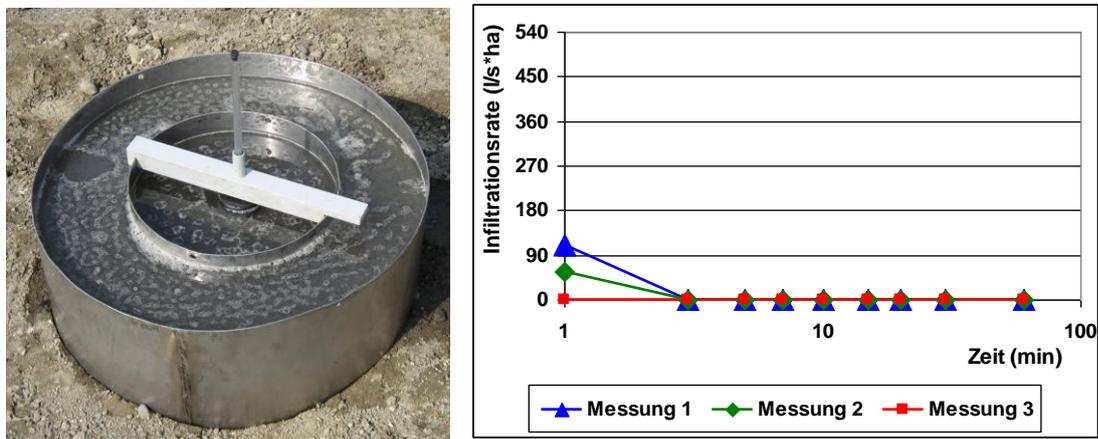


Abbildung 51: Infiltrationsversuch mittels Doppelringinfiltrometer (links: Doppelringinfiltrometer-Versuch mit instationärem Druckgefälle; rechts: zeitliche Abnahme der flächenbezogenen Infiltrationsraten der drei Infiltrationsversuche).

Die ermittelten flächenbezogenen Infiltrationsraten liegen deutlich unterhalb der geforderten $540 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$. Zu Beginn der Messungen 1 und 2 liegt die Infiltration bei 10 bzw. 20 % der zu erreichenden Infiltrationsraten. Maßgebend ist aber die Infiltrationsrate, welche über längere Zeit konstant bleibt. Diese liegt bei allen drei Durchgängen bei null.

Tabelle 15: Ergebnisse der flächenbezogenen Infiltrationsraten der Doppelringinfiltrometer-Versuche (in mm/s und $\text{l/(s}\cdot\text{ha)}$).

	Flächenbezogene Infiltrationsraten	
	(mm/s)	($\text{l/(s}\cdot\text{ha)}$)
Infiltrometer 1	$5,3 \cdot 10^{-4}$	5,3
Infiltrometer 2	$3,7 \cdot 10^{-4}$	3,7
Infiltrometer 3	0	0

1 $\text{mm/s} = 1 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2) = 10.000 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$

Der Bau von wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen ist nach diesem Kriterium nicht erlaubt. Um die Vorteile der Untersuchungsfläche dennoch nutzen zu können, wurde unterhalb des wasserdurchlässigen Straßenaufbaus eine Drainageschicht (auch Sauberkeitsschicht genannt) eingebaut. Das in dieser Schicht vorhandene Wasser wurde über einen Pumpschacht mit Schwimmer kontinuierlich abgeführt (Kapitel 4.4). Über diese Konstruktion wurde das Kriterium für den Bau von wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen technisch erfüllt.

4.3 Genereller Versuchsaufbau

Der Geländeversuch basiert auf einer vergleichenden Messung der aktuellen Verdunstungsraten (Kapitel 9.10.5). Der Vergleich der Verdunstungsraten sollte immer zu einem Standard, in diesem Falle also einem standardisierten Messfeld erfolgen. Dieses Messfeld, im weiteren Text als Referenzfläche oder Messfeld 1 bezeichnet, sollte an möglichst viele weitere Felder angrenzen. Dadurch können mehrere verschiedene Bauweisen direkt mit der Referenzfläche verglichen werden. Als optimal wurde daher eine hexagonale Form der Messfelder erarbeitet. Angeordnet wie Bienenwaben ist es somit möglich, sechs äußere Felder direkt an die Referenzfläche angrenzen zu lassen. Dadurch, dass alle Felder eine einheitliche Form und Größe haben und dass keine Lücken zwischen den Messfeldern entstehen, sind störende Einflüsse (z.B. unterschiedliche Bewindung, unterschiedliche bodennahe Lufttemperaturen) bedingt durch die Flächengeometrie auszuschließen. Die Belegung der Felder ergibt sich aus den Laboruntersuchungen in den Kapiteln 3.1 und 3.2. Hauptaugenmerk der Messfeldbelegung sind bereits existente Straßenbaumaterialien und Straßenbauweisen. Variationen treten daher sowohl in der Tragschicht, der Fuge und dem Pflasterbelag auf. Diese Messfeldbelegung wird im Folgenden Messfeldbelegung I für den Geländeversuch I genannt.

Im Anschluss an die Messung der Messfeldbelegung I (Geländeversuch I) werden die bestehenden äußeren Pflasterflächen ersetzt. Eingebaut werden in der Messfeldbelegung II (Geländeversuch II) neuentwickelte Pflasterstein-Prototypen. Die Auswahl dieser basiert auf den Ergebnissen der Laboruntersuchungen (Kapitel 3.1 und 3.2).

Das gesamte Messprogramm wurde zunächst auf zwei Jahre festgelegt; letztendlich dauerte das Messprogramm drei Jahre. Die Messung der aktuellen Verdunstung sollte über möglichst viele verschiedene Witterungsbedingungen erfolgen. Daher wurde eine einjährige Messdauer pro Messfeldbelegung festgelegt. Der Umbau gestaltete sich jedoch, in Hinblick auf die zeitliche Komponente, schwierig. So mussten teilweise externe Unternehmen beauftragt werden, die eine professionelle Bauweise garantierten. Dadurch kam es teilweise zu Verzögerungen, welche jedoch für weitere, spezielle Messungen genutzt wurden.

Die für die Verdunstung relevanten Messgrößen Luftfeuchte, Temperatur, Niederschlag und Wind wurden kontinuierlich ermittelt (Kap. 4.7). Dazu wurden Geräte nach dem neuesten Stand der Technik verwendet. Diese elektronischen Geräte

wurden ergänzt durch analoge Messgeräte. Diese dienen als Kontrollmöglichkeit zu den modernen Messgeräten.

4.4 Versuchsvorbereitung

Wie die Infiltrationsversuche mit dem DRI ergaben, ist die ausgewählte Untersuchungsfläche nicht für die Versickerung in tiefere Bodenschichten geeignet, da der anstehende Untergrund zu gering durchlässig ist. Da die Vorteile dieser Fläche für die Untersuchungen aber nicht aufgegeben werden sollten, musste der Versickerungsprozess aus dem Straßenkörper heraus auf anderem Wege sichergestellt werden. Dazu wurde unterhalb des geplanten Oberbaus eine sogenannte Drainageschicht eingerichtet. Dazu wurde der anstehende Untergrund mit einem Gefälle von 2 % eingeebnet. Am tieferen Ende der Grube wurde eine zusätzliche Vertiefung von ca. 10 cm Tiefe und einer Fläche von ca. 30·30 cm ausgehoben. Hier wurde ein Pumpenschacht mit einem Filter aus gut durchlässigem haufwerksporigen Beton eingebaut (Abbildung 52). In die gesamte Grube und in die zusätzliche Vertiefung wurde die 0,10 m bis 0,30 m mächtige Drainageschicht aus grobkörnigem Hartkalksteinschotter HKS 8/16 eingebracht. Abgedeckt wurde diese Schicht mit einem Filtervlies Typ „HV 4715 B / BS“ der Firma Huesker Synthetic GmbH. Die so entstandene Schicht soll das versickerte Wasser aus dem Straßenaufbau aufnehmen und zum Filterrohr ableiten. Über eine Pumpe mit Schwimmschalter wird das Wasser abgepumpt, so dass es zu keinem Einstau in der Fläche kommen kann.



Abbildung 52: Konstruktive Versuchsvorbereitungen (links: Pumpenschacht mit einem Filter aus gut durchlässigem haufwerksporigen Beton am tiefsten Punkt der Drainageschicht, rechts: Trennung der Messfelder mittels PVC-Platten).

Auf der Drainageschicht wurden die verschiedenen Straßenaufbauten installiert. Um einen horizontalen Wasseraustausch zwischen den benachbarten Feldern zu verhindern wurden PVC-Platten vertikal zwischen den Feldern installiert. Die Platten reichen von der Drainageschicht bis ca. 1 cm oberhalb der späteren Geländeoberkante (hier oberhalb des Pflastersteines). Dadurch wird auch ein eventuell auftretender Oberflächenabfluss bei Starkregenereignissen von einem Feld auf eine benachbartes unterbunden. Die Kanten sind jedoch niedrig genug, um die Verdunstungsmessungen nicht zu beeinträchtigen. Die Stoßkanten der PVC-Wände sind durch Teichfolie abgedichtet. Dadurch kann kein Wasser durch die Kontaktstellen sickern. Das war besonders deshalb notwendig, da die PVC-Wände sich temperaturbedingt ausdehnen bzw. zusammenziehen. So konnten im Vergleich Sommer/Winter Längendifferenzen von bis zu 2 cm beobachtet werden.

4.5 Versuchsaufbau

4.5.1 Einbringung der Trag- und Bettungsschicht

Durch die bereits aufgestellten PVC-Wände gestaltete sich der Einbau der Tragschichtmaterialien schwierig. Da der Zugang zur Fläche mit größerem Gerät nur von einer Seite möglich war, wurden die Waben nach und nach von der Seite ausgehend befüllt. Die PVC-Wände zu den verbleibenden leeren Waben mussten abgestützt werden, damit diese dem Druck standhalten konnten (Abbildung 52). Die Tragschichtmaterialien wurden in 3 Lagen aufgebracht und lagenweise mit einer Rüttelplatte verdichtet. Die Gesamtmächtigkeit beträgt 0,50 m. Die Bettungsschichtmaterialien wurden auf der nachweislich verdichteten Tragschicht (Kap. 4.6.1) in einer Mächtigkeit von 0,03 m bis 0,05 m locker eingebaut.



Abbildung 53: Schrägaufsicht auf die Untersuchungsfläche mit der Messfeldbelegung I (Geländeversuch I) zur Veranschaulichung des Fugenbildes.

4.5.2 Pflasterung der Flächen

Die Pflasterung erfolgte durch Gartenbau-Fachkräfte der HKB. Die Pflastersteine werden eben d.h. ohne Gefälle verlegt. Das Fugenbild orientiert sich an der mittleren Referenzfläche und ist parallel dazu ausgerichtet. Die Fugenbreite beträgt 3 bis 5 mm (außer beim greenSTON® mit 48 mm Fugenweite). Damit beträgt der Fugenanteil ca. 5,9 % (greenSTON® ca. 55,3 %). Zum Abschluss wird das entsprechende Fugenmaterial in die Fugen mit Wasser eingeschlämmt und die Fläche abgerüttelt. Abschließend wurde in die Fuge fehlendes Fugenmaterial eingefegt.

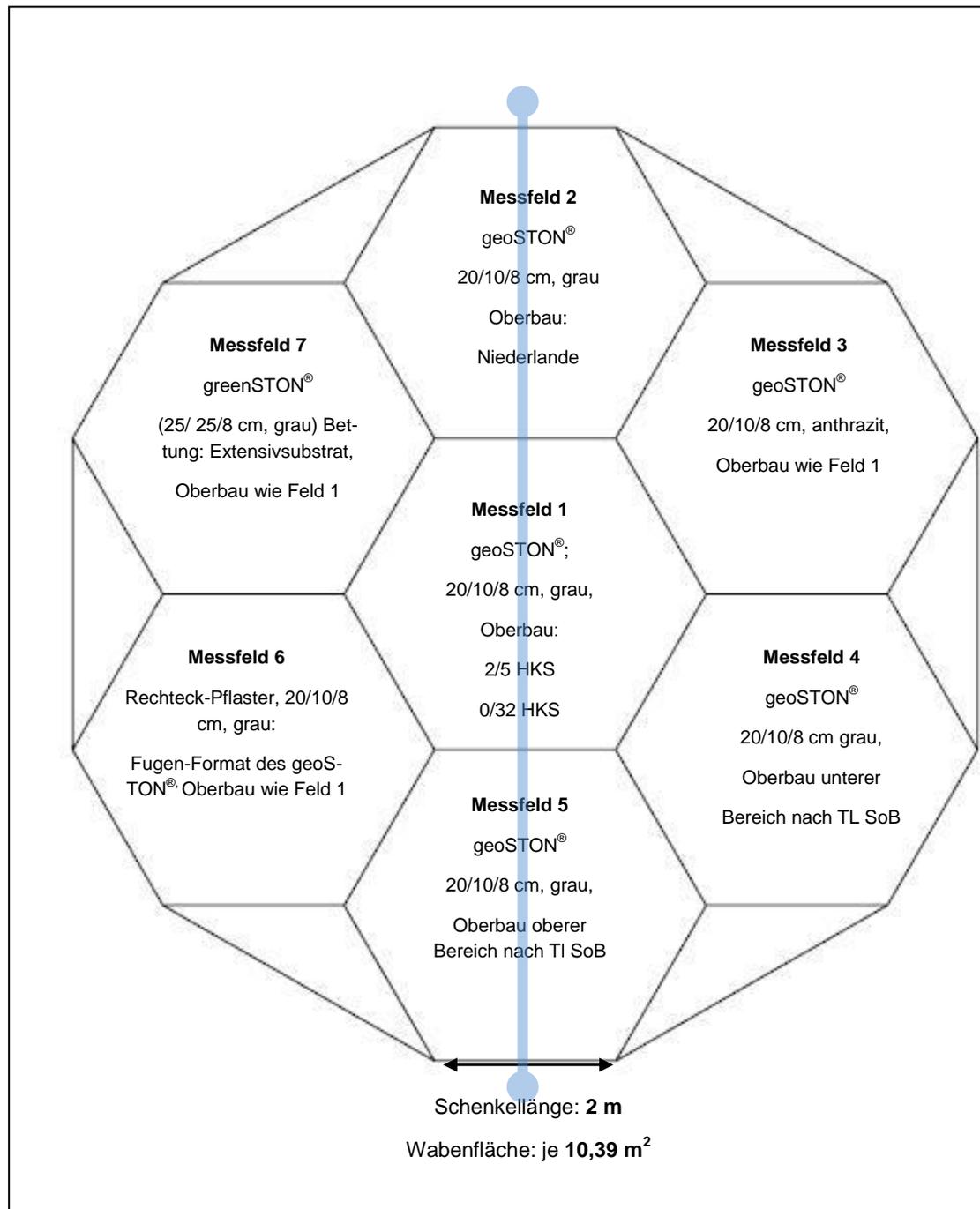


Abbildung 54: Schematischer Grundriss des Versuchsaufbaus auf der Untersuchungsfläche mit Füllung der Messfelder entsprechend der Messfeldbelegung I (Geländeversuch I); blaue Linie kennzeichnet die Schnittlage für Abbildung 55.

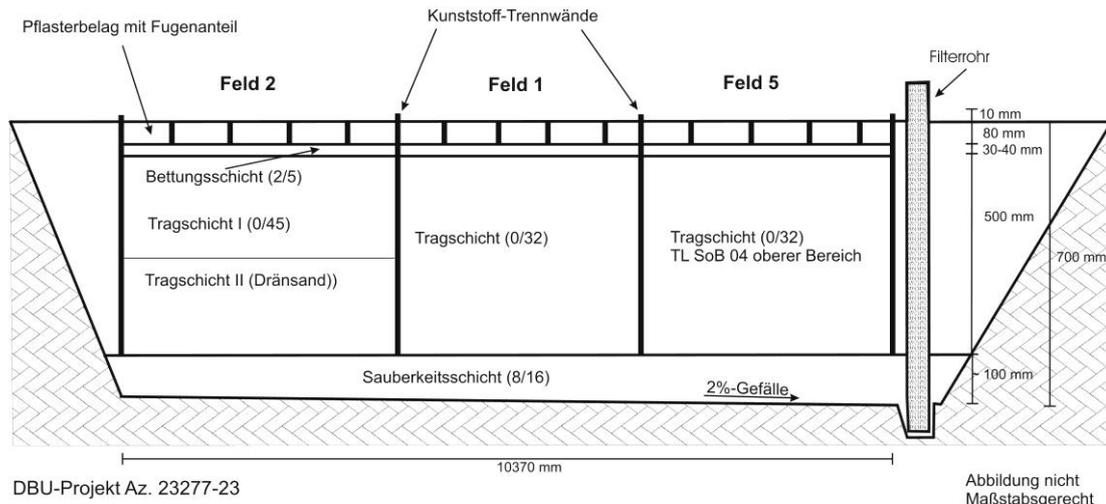


Abbildung 55: Schematische Profilschnittansicht des Versuchsaufbaus auf der Untersuchungsfläche mit Füllung der Messfelder entsprechend der Messfeldbelegung I (Geländeversuch I).

4.5.3 Installation der Oberflächenabflussmessung

Auf die Installation von Einrichtungen zur Messung des Oberflächenabflusses am Rande der Messfelder wurde im Laufe des Vorhabens verzichtet. Die Oberflächen der Messfelder sind horizontal d.h. ohne Gefälle ausgerichtet. Bei den sehr großen Infiltrationsraten der einzelnen Flächenbefestigungen (Kapitel 4.6.2) sind die Anteile des Oberflächenabflusses am Gesamtniederschlag weitestgehend zu vernachlässigen.

4.6 Felduntersuchung

4.6.1 Tragfähigkeit der Tragschicht

Die Tragschichtmaterialien wurden in die Messfelder mit dem für die maximal erreichbare Lagerungsdichte optimal eingestellten Wassergehalt (Kapitel 3.1.8) lagenweise eingebaut und verdichtet (Kapitel 4.5.1). Die Tragfähigkeit der Tragschicht wurde anschließend von der Firma Roxeler Ingenieurgesellschaft GmbH, Münster-Roxel, mittels dynamischer Lastplattendruckversuche für jedes der 7 Felder am 8.5.2008 überprüft. Der Versuch wurde mit einem leichten Fallgewicht mit einer 1,5 fachen Stoßbelastung in Anlehnung an die [FGSV05] durchgeführt. Das Verformungsmodul $E_{vd1,5}$ wurde mittels Vergleichskurve der Straßenbaubehörden des Landes Nordrhein-Westfalen für grobkörnige Boden (Korngrößen ≥ 32 mm) in das Verformungsmodul E_{V2} umgerechnet. Die Anforderungen sind erfüllt, wenn der Istwert für das Verformungsmodul E_{V2} über dem Sollwert von $E_{V2} = 120$ MN/m² nach [FGSV04c] liegt.

Die Ermittlung der Tragfähigkeit der Tragschicht mittels eines statischen Lastplattendruckversuchs nach DIN 18134 war nur an Messfeld 7 möglich (Anhang 4.1), da die Kunststoffwände kein Befahren auf die Fläche zuließen (Abbildung 56). Mit dem

Verhältnis zwischen Verformungsmodul mittels statischer Lastplatte und Verformungsmodul mittels dynamischer Lastplatte lassen sich die Ergebnisse des Verformungsmoduls der anderen Messfelder 1 bis 6 (Anhang 4.2) kalibrieren.



Abbildung 56: Durchführung des statischen Lastplattendruckversuchs (links) und des dynamischen Lastplattendruckversuchs (rechts) zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Tragschicht an Messfeld 7.

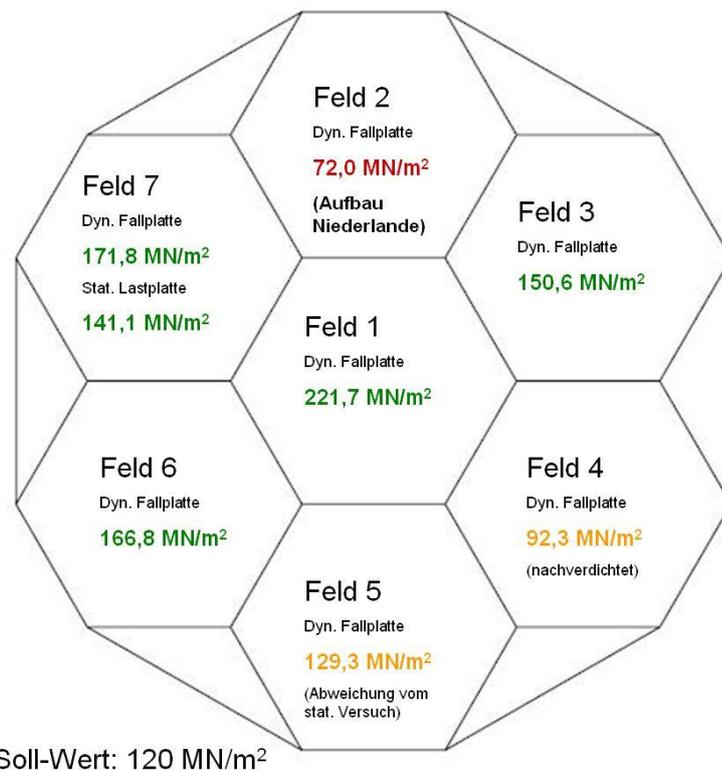


Abbildung 57: Ergebnisse der Verformungsmodule E_{v2} der Lastplattendruckversuche (MN/m^2) zur Ermittlung der Tragfähigkeit.

An Messfeld 7 sind beide Versuche durchgeführt worden; es ergibt sich ein Faktor zwischen Verformungsmodul mittels statischer Lastplatte und Verformungsmodul mittels dynamischer Lastplatte von 0,82 (Abbildung 57). Messfeld 3, 6 und 7 erfüllen die Anforderungen direkt; die Verdichtung der Tragschicht ist in diesen Feldern ausreichend. Im Messfeld 5 liegt der Istwert mit der statischen Lastplatte ermittelt noch über dem Sollwert; nach der Kalibrierung des Istwertes, liegt dieser allerdings unter dem Sollwert. Die Fläche wurde nachverdichtet. Das Verformungsmodul des Messfeldes 4 liegt unter dem Sollwert; die Fläche wurde ebenfalls nachverdichtet. Das Messfeld 2 mit dem niederländischen Aufbau erfüllt auch nach dem Nachverdichten nicht die Anforderungen. Hier wurde beim Einbau scheinbar zu wenig Wasser zugefügt, sodass die maximale Lagerungsdichte (Kapitel 3.1.8) nicht erreicht wurde.

4.6.2 Infiltrationsrate des gesamten Straßenaufbaus

Die Infiltrationsrate des fertigen Straßenaufbaus wurde mittels eines Tropfenringinfiltrimeters gemessen. In diesem Verfahren wird ein Stahlring mit einem Innendurchmesser von 54 cm auf die gepflasterte Prüffläche gelegt und seitlich mit Schnellzement oder Bentonit abgedichtet. Auf dieser definierten Testfläche ($0,25 \text{ m}^2$) wird eine Beregnung vorgenommen. Diese wird durch eine Beregnungseinheit und eine Tauchpumpe durchgeführt. Die tropfenförmige Beregnung wird durch 625 Injektionsnadeln, welche in der Beregnungseinheit verbaut sind, sichergestellt. Um einen lateralen Fluss des Wassers im Pflasterbelag zu verhindern, wird auch die Fläche außerhalb des Ringes bewässert (Abbildung 58). Die Beregnungsintensität wird durch einen kapazitiven Sensor reguliert. Diese regelt durch An- und Abschalten der Tauchpumpe einen konstanten Wasserfilm mit einer Überstauhöhe von 2 mm bis 3 mm auf der Prüffläche. Mit Hilfe eines Durchflussmessgeräts lässt sich die Beregnungsrate ermitteln. Der Versuch wird so lange durchgeführt (in der Regel 30 Minuten), bis sich eine über die Zeit konstante Infiltrationsrate eingestellt hat. Eine Software errechnet für die Prüffläche anschließend minutenweise die Infiltrationsrate [MUNLV05]. Nach den Anforderungen [FGSV98] muss eine wasserdurchlässige Flächenbefestigung eine Bemessungsregenspende von mindestens $270 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ vorweisen; das entspricht einem Durchlässigkeitsbeiwert von $2,7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ bzw. einer Niederschlagshöhe von $97,2 \text{ mm/h}$.

Die Infiltrationsmessungen wurden für beide Messfeldbelegungen durchgeführt. Die Infiltrationsraten der Messfeldbelegung I wurden am 22.07.2008 ermittelt, von Messfeldbelegung II am 25.01.2011.

Die Ergebnisse zeigen (Anhang 4.2, Tabelle 17), dass alle Felder ca. 1 Monat nach der Installation die Anforderungen erfüllen. Die Referenzfläche 1 zeigt mit $1.620 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ die höchsten flächenbezogenen Infiltrationsraten der Messfeldbelegung I. Das optimierte Messfeld 7 (Prototyp T, $1.690 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$) und Messfeld 5 (Prototyp N, $1.600 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$) der Messfeldbelegung II zeigen etwas höhere flächenbezogene Infiltrationsraten. Das Messfeld 2 (Tragschicht Niederlande $1.500 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), das Messfeld 5 (gröbere Tragschicht, $1.580 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$) zeigen mit und vergleichbar hohe flächenbezogene Infiltrationsraten. Das Messfeld 3 (geoSTON® protect anthrazit,

Geo) und das Messfeld 4 (feinere Tragschicht) zeigen Infiltrationsraten von 1.200 l/(s·ha). Der gefügedichtete Pflasterstein (Messfeld 6, 920 l/(s·ha)), der Rasengitterstein (Messfeld 7, 950 l/(s·ha)) und der drainSTON® (Messfeld 4, 400 l/(s·ha)) weisen demgegenüber geringere flächenbezogene Infiltrationsraten auf; die Anforderungen sind dennoch erfüllt. Nach 2,5 Jahren reduziert sich die flächenbezogene Infiltrationsrate bei der Referenzfläche 1 um knapp die Hälfte auf 890 l/(s·ha) und beim Messfeld 3 (geoSTON® anthrazit) um 30% auf 830 l/(s·ha); die Anforderungen bleiben aber nach 2,5 Jahren weiterhin erfüllt (dreimal so gute Infiltrationsleistung als der Sollwert).

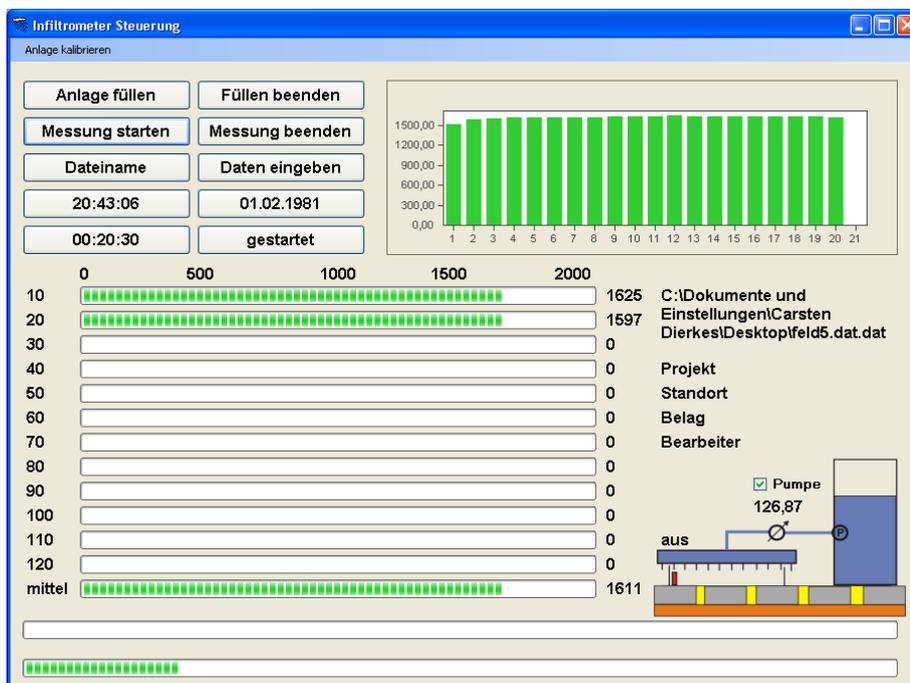


Abbildung 58: Tropfenringinfiltrometer-Versuch (links: Übersicht über den Versuchsaufbau mit Berechnungsanlage, Rechts: Detailansicht des abgedichteten Stahlringes mit kapazitivem Sensor; unten: EDV-Auswertung mit Beispiel für Flächen mit hoher flächenbezogener Infiltrationsrate).

4.6.3 Wassergehalt der Fuge

Die Messung des Wassergehaltes in der Bettungsschicht unterhalb der Fuge mittels TDR-Sonden („time domain reflectometry“; Typ „TRIME-ES“ der Firma IMKO Micromodultechnik GmbH) ermöglicht eine Aussage über den Wasserfluss in der Fuge im Vergleich zum wasserdurchlässigen Pflasterstein. Dafür wurden drei TDR-Sonden in die Bettungs- und Tragschicht in der Referenzfläche 1 unter dem Flächenbelag in den Tiefen 0,10 m (Bettungsschicht), 0,20 m und 0,30 m durch Einschlämmen der Sondenspitzen mittels 0/2 gewaschenen Sand am 24.04.2008 eingebaut. Leider brachen die Sondenspitzen beim Verdichtungsvorgang ab, weshalb keine Daten ausgelesen werden konnten.

Ebenso wurden die zusätzlich eingebauten Tensiometer Typ „T5 Miniatur-Tensiometer“ der Firma UMS GmbH (Umweltanalytische Messsysteme) mit einem Messbereich -1000 hPa bis +850 hPa zur punktuellen Messung der Bodenwasser-spannung im Straßenaufbau jeweils dreifach in den Tiefen 0,10 m (Bettungsschicht), 0,20 m und 0,30 m beim Verdichten der Fläche zerstört, weshalb hier ebenfalls keine Daten ausgelesen werden konnten.

4.6.4 Temperatur der Fuge

Die Messung der Temperatur in der Bettungsschicht unterhalb der Fuge ermöglicht eine Aussage über den Wärmetransport in diesen Schichten. Der Einbau der Temperaturfühler erfolgte am 24.04.2008 in der Referenzfläche jeweils zweifach in den Tiefen 0,10 m (Bettungsschicht), 0,20 m und 0,30 m. Die Daten konnten aufgrund von EDV-Problemen nur im Zeitraum 30.09.2011 bis zum 16.11.2011 ausgewertet werden. Zu Beginn dieses Zeitraumes herrschten Lufttemperaturen von $T_{\max} = 34^{\circ}\text{C}$ bis $T_{\min} = 12^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 22^{\circ}\text{C}$) vor. Die oberflächennahen Temperatursensoren zeigten parallel dazu Schwankungen von $T_{\max} = 45^{\circ}\text{C}$ bis $T_{\min} = 31^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 14^{\circ}\text{C}$) an. Mit zunehmender Tiefe nehmen die Temperaturen bis auf 13°C und die Schwankungen bis auf $\Delta T = 2^{\circ}\text{C}$ ab. Am 30.09.2011 wurde ebenfalls eine Infrarotmessung der Pflasteroberflächen durchgeführt. Die Referenzfläche zeigte dabei Oberflächentemperaturen von $29,7^{\circ}\text{C}$ (Kap. 4.13). Ende Oktober 2011 lagen die Lufttemperaturen zwischen $T_{\max} = 19^{\circ}\text{C}$ bis $T_{\min} = 3^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 16^{\circ}\text{C}$) vor. Die oberflächennahen Temperatursensoren zeigten parallel dazu Schwankungen von $T_{\max} = 30^{\circ}\text{C}$ bis $T_{\min} = 20^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$) an. Mit zunehmender Tiefe nehmen die Temperaturen bis auf 4°C und die Schwankungen bis auf $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$ ab. Im weiteren Verlauf der Messungen nahmen die oberflächennahen Temperaturen weiterhin ab ($T_{\max} = 25^{\circ}\text{C}$ bis $T_{\min} = 15^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$); die Sensoren in 0,30 m Tiefe zeigten dann Bodentemperaturen von nahezu 0°C an.

4.7 Messung der klimatischen Kenngrößen

4.7.1 Niederschlagsrate

Der Niederschlagsrate wurde mit einem Hellmann-Regenschreiber (Auffangfläche 200 cm^2) erfasst. Dabei handelte es sich um ein analoges Gerät mit Trommelschrei-

ber (Umlaufzeit der Trommel 1 Woche). Daher mussten im wöchentlichen Turnus die Schreibblätter gewechselt und die gesammelte Regenmenge ausgelitert werden. Die Messgenauigkeit des Gerätes beträgt 0,1 mm. Während der Versuchsdauer wurden zwei heftige Niederschlagsereignisse ermittelt, die für die späteren Simulationen (Kap. 4.10) herangezogen wurden. Am 03.07.2009 ereignete sich ein mittleres Niederschlagsereignis mit 46 mm in 2 h [entspricht 0,383 l/(min·m²)] und am 26./27.08.2010 ein langes Niederschlagsereignis mit 108,8 mm in 24 h [entspricht 0,076 l/(min·m²)].

4.7.2 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur wurde standardmäßig vom TUV (Kap. 10.10.4) erfasst. Bei den Sensoren handelt es sich um Feuchte-Temperatur-Sonden Typ „KRC3/6-ME“ der Firma Galltec Mess- und Regeltechnik GmbH mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,2$ K. Die Messung findet in 0,25 m Höhe über dem Erdboden statt. Diese Höhe ist bedingt durch die Bauart des TUV. In diesem Fall ist diese Höhe akzeptabel, da die bodennahen Lufttemperaturen eine wichtige Rolle bei der Verdunstung spielen. Zur Kontrolle der elektrischen Sensoren des TUV, wurde ein Thermohygrograph auf dem Messfeld installiert. Die Lufttemperatur wird durch eine Bimetallfeder erfasst, welche mit einem Trommelschreiber verbunden ist. Die Lufttemperaturen liegen zwischen 3°C (Frostabschaltung des TUV) und 36°C (Juni/Juli 2011).

4.7.3 Relative Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit wurde ebenfalls von den Feuchte-Temperatur-Sensoren (Kap. 10.10.2) des TUV aufgezeichnet. Die relative Luftfeuchtigkeit wurde mit einer Genauigkeit von ± 2 % *rF* ermittelt.

Analog zur Lufttemperatur wurden auch bei der relativen Luftfeuchtigkeit die Sensoren des TUV durch einen Thermohygrographen mittels Haar-Hygrometer kontrolliert. Das Prinzip der Messung beruht auf der Längung eines Rosshaares verschiedenen Feuchtezuständen, welche ebenfalls mit dem Trommelschreiber verbunden ist.

Für die Kalibrierung des Haarhygrometers, wurde ein Aspirations-Psychrometer nach Aßmann genutzt. Dieses besteht aus zwei baugleichen Thermometern. Über eines der beiden Thermometer ist ein Strumpf aus Gaze gezogen, welcher vor der Messung ausreichend mit Wasser durchtränkt wird. Beide Thermometer stecken in Metallröhren, welche nach unten offen, nach oben mit einem Ventilator verbunden sind. Der Ventilator wird über eine Spannfeder aufgezogen und erzeugt anschließend einen konstanten Luftstrom in den beiden Röhren. Die Luft streicht somit an beiden Thermometern vorbei. Das Wasser im Gazestrumpf verdunstet dabei und bewirkt eine Temperaturerniedrigung an dem entsprechenden Thermometer, bis ein konstantes Niveau erreicht wird. Generell gilt, je trockener die Umgebungsluft ist, desto größer ist die Abkühlung an diesem Thermometer. Das zweite Thermometer zeigt weiterhin die Temperatur der Umgebungsluft an. Über die Temperaturdifferenz kann die Luftfeuchte der Umgebungsluft ermittelt werden.

Die relativen Luftfeuchtigkeiten sind abhängig von den Lufttemperaturen und schwanken zwischen hohen Werten von fast bis 99 % in den frühen Morgenstunden und bei Regenereignissen und niedrigen Werten von 18 % bzw. 25 % am späten Nachmittag.

4.7.4 Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit wurde bodennah durch ein Schalensternanemometer erfasst. Der kugelgelagerte Schalenstern wird durch Wind in Rotation gebracht. Durch eine optoelektronische Geschwindigkeitsabtastung entsteht eine Frequenz, die mit einem integrierten Messumformer in ein analoges Signal umgewandelt werden. Das verwendete Schalensternanemometer Typ „Windgeber-compact“ der Firma Adolf Thies GmbH & Co. KG ist im TUV integriert und die Windgeschwindigkeiten können über den TUV ausgelesen werden. Es können Windgeschwindigkeiten zwischen 0,5 m/s und 80 m/s mit einer Auflösung von 0,1 m/s erfasst werden. Bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 10 m/s wird der TUV abgeschaltet.

4.7.5 Aktuelle Verdunstung

Die Messung der aktuellen Verdunstung wurde mit dem neuartigen TUV nach [W01] und [WWS02] durchgeführt. Der TUV besteht aus einem beidseitig offenen Acrylglas-Halbrohr, welches über ein Hebegestänge abwechselnd auf zwei benachbarte Felder abgesetzt wird. Dadurch sind die beiden Messfelder nur ca. 12 % der Zeit vom Tunnel abgedeckt. Einflüsse auf das Mikroklima durch Insolation und Abschattung gegenüber Niederschlägen sind somit minimiert. Darüber hinaus wird über eine Ventilatoreinheit im Tunnel ein Luftstrom induziert, welcher exakt der außen vorherrschenden Windgeschwindigkeit entspricht. Diese wird durch das oben bereits erwähnte Schalensternanemometer ermittelt und per Software die Ventilatoreinheit passend angesteuert. Im Tunnel sind darüber hinaus die beiden oben beschriebenen Feuchte- und Temperatursensoren angebracht. Dadurch wird der Wasserdampfgehalt der Luft an beiden Enden des TUV ermittelt. Über den induzierten Luftstrom ergeben sich, bedingt durch die aktuelle Verdunstung, Unterschiede im Wasserdampfgehalt der Luft. Über den Volumenstrom der durchgesetzten Luft und der Größe der abgedeckten Fläche lässt sich die aktuelle Verdunstung errechnen. Der Umstand, dass der Tunnel abwechselnd zwischen zwei benachbarten Feldern wechselt, wurde in diesem Projekt dazu ausgenutzt, zwei unterschiedliche Pflastersteinflächen miteinander zu vergleichen. Die vergleichenden Messungen finden immer zwischen dem mittleren Messfeld (der Referenzfläche) und einem äußeren Messfeld statt. Der TUV wird dabei im wöchentlichen Turnus um ein äußeres Feld weitergeschoben. Dadurch werden alle Felder mit der Referenzfläche im Laufe von sechs Wochen vergleichend gemessen. Da das Wettergeschehen nicht gesteuert werden kann, ist es bei der „Rotation“ des Tunnels um die Referenzfläche zu Abweichungen vom vorgegebenen Turnus gekommen.

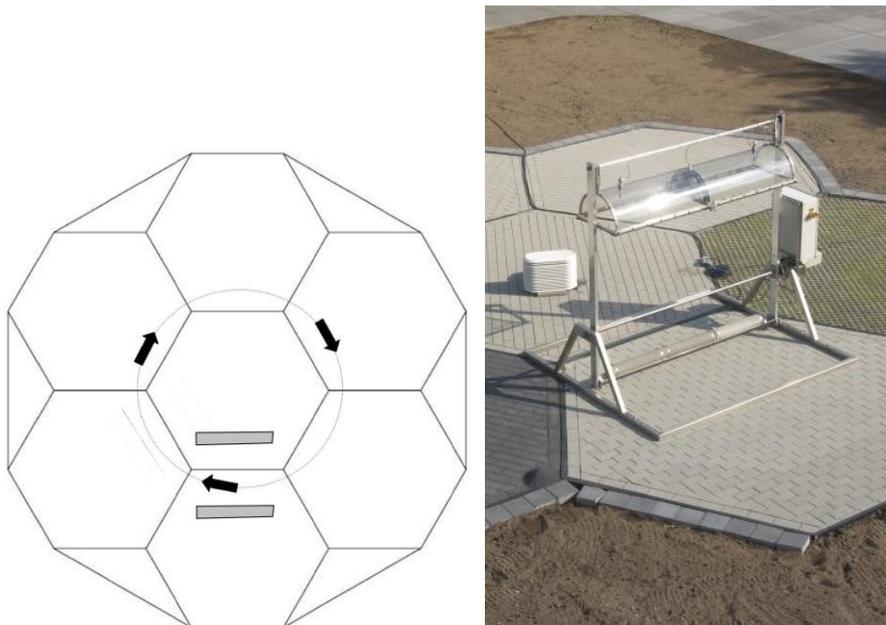


Abbildung 59: Darstellung der Rotation des „Tunnel“-Verdunstungsmessers (TUV) um die Referenzfläche.

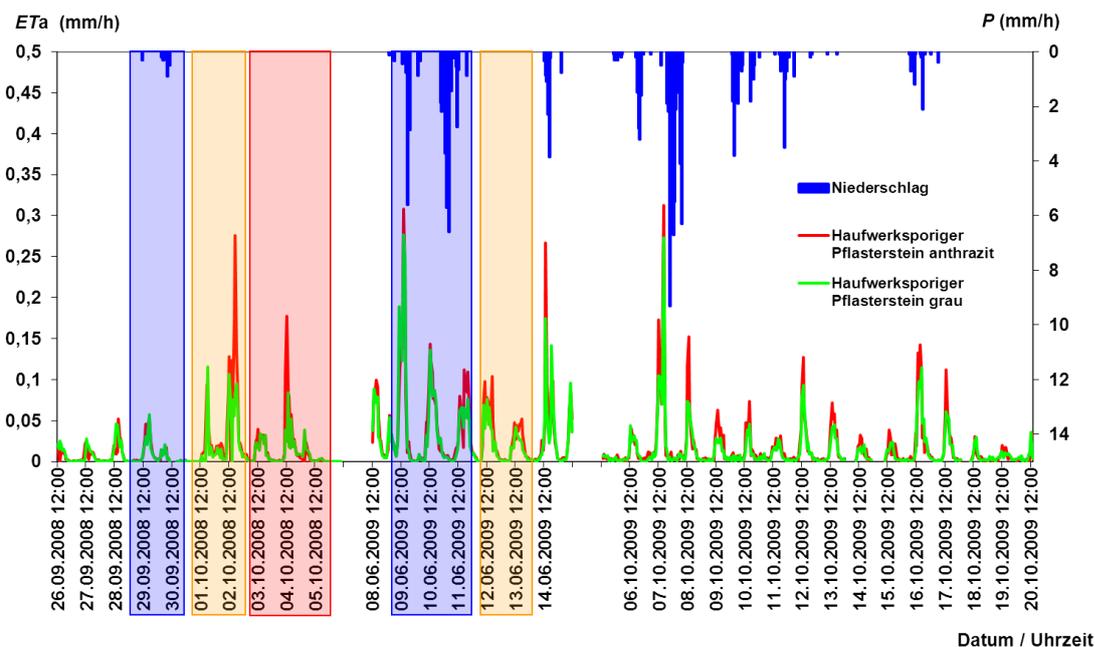


Abbildung 60: Exemplarische Messung der aktuellen Verdunstungsrate ET_a (mm/h) und der Niederschlagsrate P (mm/h) für die innen liegende Referenzfläche 1 (grüne Linie) und dem Messfeld 3 aus Geländeversuch I mit geoSTON® protect anthrazit (rote Linie) [SGC11].

4.7.6 Grasreferenzverdunstung

Da im Rahmen des Geländeversuches immer nur zwei angrenzende Felder im Vergleich gemessen werden können (in der Regel wird die mittlere Referenzfläche im Vergleich zu einem in der Wabe außenliegenden Messfeld gemessen), ist ein Vergleich der außenliegenden Messfelder (sofern sie nicht benachbart liegen und direkt im Vergleich gemessen werden können) für unterschiedliche Witterungsbedingun-

gen über die Ermittlung der Grasreferenzverdunstung als Referenzwert möglich. Die Grasreferenzverdunstung ist die berechnete potentielle Verdunstungshöhe über einer ebenen Fläche, die mit einheitlichem Grasbestand von 0,12 m Höhe bei fehlendem Wasserstress (Bodenfeuchte $\geq 70\%$ nFK) bewachsen ist. Sie wird wie der Niederschlag in mm/d angegeben. Die Berechnung der Tageswerte der Grasreferenzverdunstung aus den Messgrößen des TUV erfolgt in Anlehnung an WENDLING (1995) über die Gleichung

$$ET_0 = g(T, v) \cdot \left(\left(\frac{Rn}{L} \cdot 24 \right) + f(T) \cdot v_2 \cdot \left(1 - \frac{U}{100} \right) \right). \quad \text{Gl. 23}$$

Die beiden dimensionslosen Temperaturfunktionen lauten für Tageswerte bei $t = 24$ h:

$$f(t) = \frac{e_s(T)}{s} \cdot \frac{\gamma \cdot 90}{T + 273} \quad \text{Gl. 24}$$

$$g(T, v) = \frac{s}{s + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot v_2)} \quad \text{Gl. 25}$$

Der Strahlungsbilanzmesser konnte aus EDV-Problemen nur im Zeitraum vom 2.9.2011 bis zum 4.11.2011 eingesetzt werden. Die Grasreferenzverdunstung zeigt in diesem Zeitraum gegenüber der tatsächlichen Verdunstung der versiegelten Flächen eine 100-fach höhere Grasreferenzverdunstung. Beim Vergleich des Rasengittersteins mit der mittleren Referenzfläche sind nicht annähernd so große Unterschiede gemessen worden. Allerdings gingen in die Grasreferenzverdunstungsberechnung die im TUV gemessenen Windgeschwindigkeiten (Kap. 4.7.4), relative Luftfeuchtigkeiten (Kap. 4.7.3) sowie Lufttemperaturen (Kap. 4.7.2) ein. Die Strahlungsbilanz wurde an einem Mast in 2 m Höhe über einer benachbarten Grasfläche mit einem „net radiator“ mit Lupulenbeschichtung Typ „6020.0000 BG“ der Firma Theodor Friedrichs & Co. durchgeführt; es muss davon ausgegangen werden, dass der Grasbewuchs in den relativ trockenen Wochen einen Wasserstress erlitt. Die Pflastersteinbeläge zeigen über den Nachmittag durch Einstrahlung recht hohe Temperaturen von über 30°C; damit stellen diese eine unrealistische Grundlage zur Berechnung der Grasreferenzverdunstung dar. Damit ist feststellbar, dass die Grasreferenzverdunstung nicht als Referenzwert für den Vergleich der außen liegenden Messfelder verwendbar ist.

4.8 Durchführung der Geländeversuche

Für den ersten Geländeversuch (Geländeversuch I: 07/2008 - 09/2010) wurden überwiegend marktübliche Straßenaufbauten verwendet und der Einfluss unterschiedlicher Tragschichten (Messfeld 2, 4 und 5), der Pflastersteinfarben (Messfeld 3), der Vegetation (Messfeld 7) und der Wasserdurchlässigkeit des Pflastersteins (Messfeld 6) untersucht. Im zweiten Geländeversuch (Geländeversuch II: 03/2011 – 11/2011) wurden ausgewählte entsprechend optimierte Pflasterstein-Prototypen (Messfeld 5 und 7) eingesetzt und der Einfluss der vollständigen Versiegelung durch abgedichtete Fugen (Fläche 6) und Asphaltierung (Messfeld 2) untersucht. Die feinkörnigen Prototypen, die auf der Labormaschine manuell hergestellt wurden, mit den vergleichsweise hohen Verdunstungsraten im Labor (Kap. 3.2.12) konnten im Werk nicht maschinell in einer Kleinserie hergestellt werden, da die Masse am Verdichtungstempel kleben blieb. Dafür sind weitere technische Innovationen in der Fertigungstechnik notwendig. Lediglich der manuell hergestellte Prototyp T konnte maschinell als Prototyp Tm in einer Kleinserie für den Geländeversuch II hergestellt werden. Der manuell hergestellte Prototyp N entspricht der Serienproduktion greenSTON combi®; lediglich die anthrazit-Färbung ist angepasst worden.

Tabelle 16: Übersicht über den zeitlichen Verlauf der Geländeversuche I und II (①-⑩ chronologisch sortierte Messperioden über ein Jahr).

Außenliegende Felder Kurzbezeichn.	Messfeld 2 Tragschicht Niederlande	Messfeld 3 geoSTON® protect anthrazit	Messfeld 4 Feinere Tragschicht	Messfeld 5 Größere Tragschicht	Messfeld 6 Gefügedicht	Messfeld 7 Haufwerksporiger Rasengitterstein	
Innenliegende Referenzfläche 1	geoSTON® protect grau (10/20/8) mit Basaltsplitt 1/3 in 3-5 mm weiten Fugen über HKS 2/5A als Bettung (30-50 mm mächtig) und HKS 0/32 als Tragschicht (500 mm mächtig)						
Geländeversuch I							
Vergleichsfläche	geoSTON® protect grau (20/10/8)	geoSTON® protect anthrazit (20/10/8)	geoSTON® protect grau (20/10/8)	geoSTON® protect grau (20/10/8)	Gefügedichtetes Rechteckpflaster grau (20/10/8)	greenSTON® braun (25/25/8)	
Belag (80 mm stark)	Basaltsplitt 1/3	Basaltsplitt 1/3	Basaltsplitt 1/3	Basaltsplitt 1/3	grau (20/10/8)	mit ca. 48 mm Fugenweite	
Fugenfüllung (3-5 mm weit)	HKS 2/5A	Basaltsplitt 1/3	HKS 2/5A	HKS 2/5A	Basaltsplitt 1/3	30% Basaltsplitt 1/3 + 70% Extensivsubstrat	
Bettungsschicht (30-50 mm mächtig)	Tragschicht NL 0/45 / Drainsand NL 1/3	HKS 2/5A	unterer Bereich TL-SoB	oberer Bereich TL-SoB	HKS 2/5A	70% HKS 2/5A + 30% Extensivsubstrat	
Tragschicht (500 mm)		HKS 0/32			HKS 0/32	HKS 0/32	
Fugenanteil	5,7 %	5,7 %	5,7 %	5,7 %	5,7 %	55,3 %	
Erstellt am	Juni 2008	Juni 2008	Juni 2008	Juni 2008	Juni 2008	Juni 2008	
Messungen der Verdunstung im Jahr 2008	④ 16.09. – 26.09.	⑤ 20.09. – 06.10.	⑥ 06.10.-22.11.	① 18.08. - 22.08.	② 25.08.-08.09.	③ 10.09.-16.09.	
Messungen der Verdunstung im Jahr 2009	⑥ 26.05. – 02.06.	⑦ 08.06. – 15.06. ⑨ 05.10. – 20.10.	① 07.03. – 24.03. ⑥	② 03.04. – 21.04. ⑩ 20.10. – 27.10.	③ 21.04. – 24.04. ④ 15.05. – 18.05.	⑤ 18.05. – 20.05. ⑪ 10.11. – 24.11.	
			⑩ 15.06. – 12.07.				
Messungen der Verdunstung im Jahr 2010		① 14.06. – 02.08. ② 18.08. – 16.09.					

Geländeversuch II						
Außenliegende Felder Kurzbezeichn.	Messfeld 2 Asphalt	Messfeld 3 geoSTON® protect anthrazit	Messfeld 4 drainSTON®	Messfeld 5 Prototyp N	Messfeld 6 Gefügedicht abgedichtet	Messfeld 7 Prototyp Tm
Vergleichsfläche	Asphalt	geoSTON® protect an- thrazit (20/10/8)	drainSTON® anthrazit (21/14/8)	Prototyp N anthrazit greenSTON® combi (20/20/8)	Gefügedichtes Rechteck- pflaster Mit abgedichteten Fugen (20/10/8)	Prototyp Tm anthrazit (20/10/8)
Belag (80 mm stark)	HKS 2/5A	Basaltsplitt 1/3	40% Basaltsplitt 1/3 + 50% gewaschener Sand 0,5/1	Basaltsplitt 1/3 HKS 2/5A		Basaltsplitt 1/3
Fugenfüllung (3-5 mm weit)	HKS 0/45 / Drainsand	HKS 2/5A HKS 0/32	30% HKS 2/5A + 70% gewaschener Sand	oberer Bereich TL-SoB		HKS 2/5A HKS 0/32
Bettungsschicht (30-50 mm mächtig)			unterer Bereich TL-SoB			
Tragschicht (500 mm mächtig)						
Fugenanteil	0 %	5,7 %	8,2 %	3,9 %	nahezu 0 %	5,7 %
Erstellt am	Okt. 2010	Juni 2008	Sept. 2010	Sept. 2010	abgedichtet März 2010	Sept. 2010
Messungen der Verdunstung im Jahr 2010	③ 17.10. – 19.11. (Ventilatoren defekt)				① 13.04. – 26.04. ② 29.04. – 20.05.	
Messungen der Verdunstung im Jahr 2011	② 06.04. – 26.04. ⑦ 18.08. – 30.09.		③ 27.04. – 17.05. ⑧ 30.09. – 16.11.	④ 17.05. – 15.06. ⑤ 17.06. – 15.07.		① 18.03. – 06.04. ⑥ 15.07. – 18.08.

4.9 Erfassung des Versickerungsprozesses

Die Leitbahnen der Versickerung für die unterschiedlichen Flächenbefestigungen lassen sich mit sogenannten Färbeversuchen (Versickerungsversuche mit angefärbtem Wasser) dokumentieren. Diese Versuche wurden bereits von [N07] an gefügedichteten Pflasterungen in Berlin durchgeführt. Die Untersuchungen im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführt [B10].

Nach diversen Vorversuchen im Labormaßstab in einer Stahlwanne und an den Einzelmaterialien wurden an vier Messfeldern des Geländeversuches I (Messfeld 2, 4, 5, 6) Färbeversuche durchgeführt. Als Farbstoff wurde der Lebensmittelfarbstoff Coomassie®-Brilliant-Blue R-250 (C45H44N3NaO7S2) verwendet. Eine ausreichende Farbtintensität wurde mit 2,5 mg/l Konzentration erreicht. Der Färbeversuch wurde in Anlehnung an einen DRI-Versuch zur Bestimmung der Durchlässigkeit im Gelände nur mit einem Außenring (Durchmesser 0,53 cm, Fläche 0,220618 m²) durchgeführt. Dieser wurde jeweils auf die randlichen Bereiche der ebenen Messfelder aufgesetzt und von außen und innen mit einer festen Bentonit-Knetmasse abgedichtet. Die eingesetzte Wassermenge entsprach dem 1,5-fachen Wasserhaltevermögen des Straßenaufbaus bis 60 cm Tiefe mit einem 5% Fugenanteil (Messfeld 2: 29,18 l, Messfeld 4: 21,06 l, Messfeld 5: 21,84 l, Messfeld 6: 7,53 l). Das gefärbte Wasser wird dann mit Hilfe eines Eimers in den Infiltrometering gegeben und abgewartet, bis es vollständig versickert ist. Nach der Versuchsdurchführung wird die jeweilige Fläche unter und um den Außenring schichtweise aufgenommen bzw. aufgegraben und mit Fotos dokumentiert.

Die Ergebnisse der Färbeversuche zeigen eindeutig bevorzugte Fließwege des Wassers an. Bei den Feldern mit haufwerksporigem Pflasterstein war nicht, wie zuvor vermutet, die gesamte Bettungsschicht direkt unter dem Pflaster gefärbt, sondern es waren ein signifikanter Fugenabdruck und dazwischen punktuelle Färbungen zu erkennen. Diese Färbungen breiteten sich mit zunehmender Tiefe aus, bis sie den Bereich des Infiltrationerrings vollständig gefärbt hatten. Das bedeutet, dass sich das Wasser zunächst senkrecht, dann aber auch lateral ausbreitet. Dieses Merkmal war an allen durchlässigen Flächenbefestigungen zu erkennen (Messfeld 2, 4, 5). Durch die Versuche an diesen Feldern wird deutlich, dass das Wasser schneller versickert, jedoch der bevorzugte Versickerungsweg nach wie vor die Fugen sind [B10].

Probleme der Ergebnisauswertung entstanden durch verschiedene Löslichkeiten des Farbstoffs im Wasser, beim möglichst planaren Abtragen der Bettungs- und stark verfestigten Tragschicht und durch schlechte Farbstoff-Wiederfindungsraten bei organisch angereicherten und somit dunklen Schichten.



Abbildung 61: Verlauf der Färbung in unterschiedlichen Tiefen auf dem Messfeld 2 mit wasserdurchlässigen Pflastersteinen im Geländeversuch I (a: Geländeoberkante; b: Bettungsschicht in 8 cm Tiefe; c: Bettungsschicht in 10 cm Tiefe; d: Tragschicht in 18 cm Tiefe; e: Tragschicht in 24 cm Tiefe; f: Profilansicht) [B10].

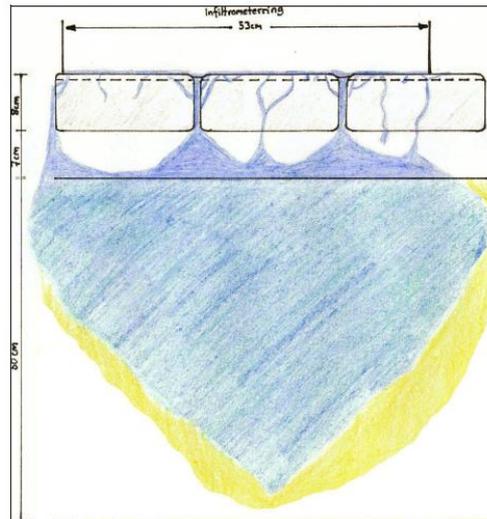


Abbildung 62: Schematische Profildarstellung des Farbverlaufes unter wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen [B10].

Ein Problem der durchlässigen Pflastersteine ist die Versickerung durch die Poren. Hier scheint nicht bei jedem einzelnen Pflasterstein eine Porenverbindung bis zur Unterseite des Steins gegeben zu sein, was die Einleitung des Wassers überwiegend über die Ränder des Steins zurück in die Fugen zur Folge hat. Das war auch an den Pflastersteinseiten deutlich zu erkennen, da bei der Aufnahme der Pflastersteine das gefärbte Wasser aus den Seitenporen lief. Ein großer Vorteil der sicke- rungsfähigen Flächenbefestigungen liegt in der Verminderung der oberirdischen Ab- flussrate, was im Versuch zu erkennen war, da das Wasser auch bei bewachsenen und verschmutzten Fugen durch den Pflasterstein in tiefere freie Regionen der Fu- genporen gelangte und versickerte. In dem Messfeld 4 war das Wasser innerhalb weniger Minuten trotz der großen Menge und der teilweise bewachsenen Fugen versickert.



Abbildung 63: Verlauf der Färbung in unterschiedlichen Tiefen auf dem Messfeld 6 mit gefügedichteten Pflastersteinen im Geländeversuch I (a: Geländeoberkante; b: Bettungsschicht in 8 cm Tiefe; c: Bettungsschicht in 10 cm Tiefe; d: Tragschicht in 15 cm Tiefe; e: Tragschicht in 22 cm Tiefe; f: Tragschicht in 30 cm Tiefe) [B10].

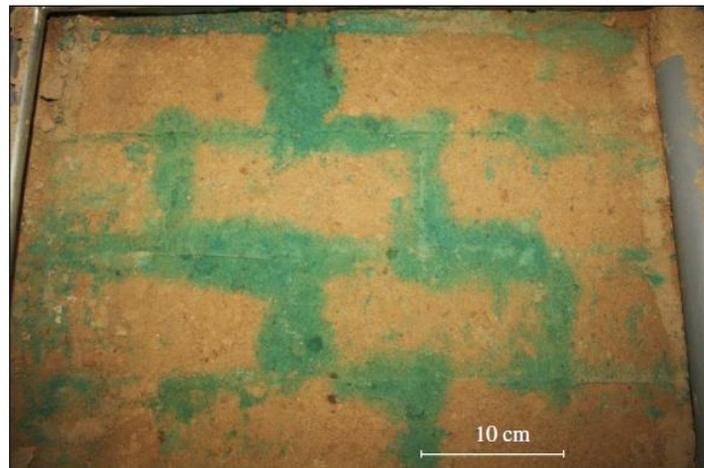


Abbildung 64: Verlauf der Färbung im Laborversuch unter gefügedichteten Pflastersteinen direkt unterhalb der Pflastersteine [B10].

Bei den Färbeversuchen von Messfeld 6 und dem Laborversuch wurde deutlich, dass gefügedichtete Flächenbefestigungen, die nur mit einer 4 mm breiten Fuge versehen sind, zu starken Oberflächenabflüssen führen müssen. Die Versickerung dauerte bei einer Wassermenge von etwa 7,5 l mehr als 24 h. Wenn dann noch ein starker Bewuchs des Fugenmaterials zu verzeichnen ist, könnte die Versickerung voll-

ständig stagnieren. Die Berechnungen der prozentualen Farbbenetzung aus dem Laborversuch haben ergeben, dass nicht alle Poren in den Fugen miteinander verbunden sind. Daher waren nicht gefärbte Bereiche vor allem im unteren Bereich des Pflastersteins zu verzeichnen. Dennoch gelangte das gefärbte Wasser bis zur Bettungsschicht und hinterließ dort Spuren. Beide Versuche zeigten eine deutliche Fugengeometrie, die sich durch die Farbe auf der Bettungsschicht abzeichnete hat. Aber auch bei der reinen Versickerung über die Poren der Fuge, wie in den Versuchen von Feld 6 und dem Laborversuch, nahm der Fugenabdruck zunächst an Breite zu und mit weiter zunehmender Tiefe wieder ab (Abbildung 65). Dieses Merkmal war besonders gut im Laborversuch zu erkennen, da die Bettungsschicht aus Sand bestand und dieser in feuchtem Zustand besser bearbeitet und abgetragen werden konnte als der Basaltsplitt in der Bettungsschicht. So konnte ein Fugenabdruck im Tiefenprofil begutachtet und das Ergebnis festgehalten werden, was bei dem Bettungsmaterial der Flächenbefestigungen im Geländeversuche I nicht möglich war. Dennoch konnte auch beim Messfeld 6 mit dem gefügedichteten Pflasterstein eine anfängliche Verbreiterung mit anschließender Abnahme der Breite verzeichnet werden. Auch hier war das Abtragen des Bettungs- und Tragschichtmaterials nicht ohne teilweise Zerstörung oder Veränderung der Ergebnisse möglich. Der Laborversuch eignete sich für die Ergebnisdokumentation am besten, wobei auch hier gefärbte Sandkörner beim Abtragen einzelner Schichten in nichtgefärbte Bereiche gelangten und auf der digitalen Dokumentation nicht als solche erkennbar sind [B10].

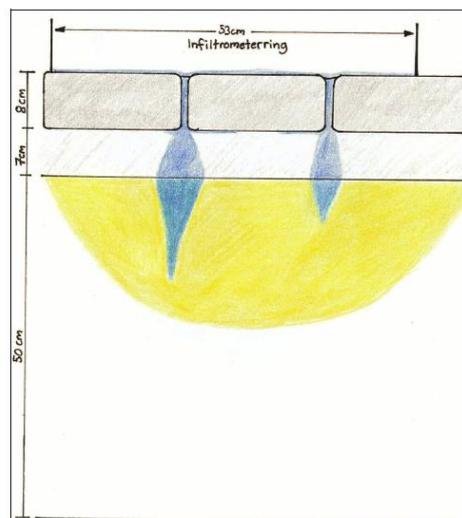


Abbildung 65: Schematische Profildarstellung des Farbverlaufes unter wasserundurchlässigen gefügedichteten Flächenbefestigungen [B10].

[N07] führte ähnliche Färbversuche an fünf verschiedenen Standorten in Berlin durch. Dabei untersuchte er ebenfalls die bevorzugten Versickerungswege des Wassers und kam zu ähnlichen Ergebnissen. An manchen Standorten war ebenfalls die Fugengeometrie der Pflastersteine erkennbar, die bei näherer Betrachtung zunächst breiter und mit zunehmender Tiefe wieder schmaler wurde. Die Färbung beschränkte sich in größeren Tiefen auf wenige punktuelle Bereiche. Zusätzlich führte [N07] Färbversuche an einem Mosaikpflasterstein durch. Dabei ergab sich zwar

eine homogene Infiltration, jedoch war es nicht möglich, bevorzugte Fließwege in größerer Tiefe zu erkennen. Des Weiteren waren bevorzugte Fließwege durch größere Poren des Fugenmaterials zu erkennen, wodurch ein ungleichmäßiger Abdruck in größerer Tiefe entstand. Bei den Versuchen auf den Messfeldern waren bevorzugte Fließwege bei größeren Poren, wie im Beispiel der wasserdurchlässigen Pflastersteine, erkennbar. Versuche mit wasserdurchlässigen Pflastersteinen wurden von [N07] nicht durchgeführt.

4.10 Simulation einer Hochwassersituation

Die Simulation einer Hochwassersituation wurde am Geländeversuch II im Oktober 2010 in drei Schritten durchgeführt [H10]. In einem ersten Schritt wurden Berechnungen zur Speicherkapazität des wasserdurchlässigen Straßenaufbaus durchgeführt. In einem zweiten Schritt wurde überprüft, ob die berechnete Speicherkapazität sich im Geländeversuch nachweisen lässt. Im dritten Schritt wurden die einzelnen Messfelder mit einer maximalen Niederschlagsrate bis zu einem Gleichgewicht von Zulauf und Abfluss (stationärer Zustand) beaufschlagt. Da die Infiltrationsraten der einzelnen Messfelder sehr hoch waren und die Oberflächen der Flächenbeläge kein Gefälle besitzen, wurde im Laufe des gesamten Geländeversuches niemals ein seitlicher Abfluss oder auch Überlauf der Felder beobachtet. Aus diesem Grund konnte auf eine Messung des Oberflächenabflusses gänzlich verzichtet werden. Ebenso war es nicht möglich, über eine Beregnungsanlage die großen Niederschlagsraten zu simulieren, da der Durchlass der Beregnungsnadeln begrenzt ist. Die Beregnung erfolgte bei den durchgeführten Versuchen über eine Schlauchdüse (Abbildung 66).



Abbildung 66: Aufsicht auf Messfeld 1 während der Beregnung über eine Schlauchdüse [H10].

Die *Berechnungen zur Speicherkapazität des wasserdurchlässigen Straßenaufbaus* beruhen auf den Ergebnissen des Wasseraufnahme- und -haltevermögen der einzelnen Lockermaterialien (Kap. 3.2.7 und 3.2.8) sowie den einzelnen Schichtmächtigkeiten. Der Anteil der Fugen, welche mit Fugenmaterial gefüllt sind, an der Gesamtfläche beträgt 5,7 %. Die Differenz zwischen Wasseraufnahme- und -haltevermögen des gesamten Straßenaufbaus ergibt das minimale Wasseraufnahmevermögen z.B. nach einem Regenereignis. Da davon auszugehen ist, dass sich nicht immer alle Poren mit Niederschlagswasser füllen, wird die Differenz auf 80 % reduziert. Für die Berechnungen wurden vier unterschiedliche Niederschlagsintensitäten (2 kurze Starkregenereignisse; 26,2 mm in 10 min [Bemessungsregen $r_{10(0,2)}$ mit 1,62 l/(min·m²)] und 32,4 mm in 10 min [doppelter Bemessungsregen $r_{10(0,2)}$ mit 3,25 l/(min·m²)]; mittleres Niederschlagsereignis am 03.07.2009 mit 46 mm in 2 h [entspricht 0,383 l/(min·m²)], langes Niederschlagsereignis am 26./27.08.2010 mit 108,8 mm in 24 h [entspricht 0,076 l/(min·m²)] herangezogen. Des Weiteren fand der unterlagernde natürliche Boden mit vier verschiedenen Durchlässigkeitsbeiwerten (mittlerer Sand mit $k_f = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s, schluffiger Sand mit $k_f = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s, sandiger Schluff mit $k_f = 1 \cdot 10^{-6}$ m/s, toniger Schluff mit $k_f = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s) Berücksichtigung. Alle Eingangsgrößen der Berechnungen wurden zur Vereinfachung in die einheitliche Dimension l/(min·m²) umgerechnet.

Bei einer normalen Tragschichtmächtigkeit von 0,5 m kann die innenliegende Referenzfläche mit dem geoSTON[®] protect grau 65 l/m² bis 96 l/m² Regenwasser aufnehmen (bei einem maximalen Wasseraufnahmevermögen von 96 l/m² und einem Haltevermögen nach einem vorausgegangenen Regenereignis von 31 l/m²). Der limitierende Faktor für das verfügbare Restvolumen ist der Durchlässigkeitsbeiwert des unterlagernden Untergrundes. Für einen Untergrund aus einem mittleren Sand ergibt sich auch bei einem einfachen Bemessungsregen ein ausreichendes Restvolumen für ein nachfolgendes Regenereignis oder zur Ankopplung weiterer versiegelte Flächen (Erhöhung des Anschlussverhältnisses auf 1:4,5). Für einen Untergrund mit einem schluffigen Sand reduziert sich das Volumen beinahe um die Hälfte, so dass hier eine Verdoppelung der Tragschichtmächtigkeit erforderlich wäre, um genug Sicherheiten zu haben. Hierbei könnte ein Anschlussverhältnis von 1:5,6 erreicht werden. Wenn die Tragschichtmächtigkeit erhöht wird, kann der wasserdurchlässige Straßenaufbau mehr Regenwasser aufnehmen (bei 1,0 m mächtig: 117 l/m²; bei 1,5 m mächtiger Tragschicht: 170 l/m²).

Für den *Nachweis der berechneten Speicherkapazitäten* wurde in einem Feldversuch die innenliegende Referenzfläche einer kontinuierlichen Beregnung über 2 Tage mit jeweils 4h39min und 6h50min ausgesetzt. Dabei wurden 21.800 l Wasser über die Referenzfläche versickert und der gesamte Geländeversuch mit den 7 Messfeldern, der Dränageschicht und der Bauschuttschicht am Rand der Versuchsflächen bis innerhalb der Bettungsschicht geflutet. Unter der Annahme, dass die Tragschichten aller Messfelder zusammen 2.600 l aufnehmen können und unter Berücksichtigung der vollständig wassergesättigten Dränageschicht (10 m³ mit einem Porenvolumen von ca. 28 %) und Bauschuttschicht an den Rändern der Messfläche (50 m³ mit einem Porenvolumen von ca. 28 %) und einer teilweisen Versickerung über den tieferen sehr gering durchlässigen Untergrund lässt die berechneten Speicherkapazitäten plausibel erscheinen.

Zur *Bestimmung des stationären Zustandes* wurden die Messfelder nicht komplett geflutet, sondern es wurde während der Beregnung mittels Unterwasserpumpe über den Pumpenschacht das versickernde Regenwasser wieder abgepumpt, bis sich ein Gleichgewichtszustand zwischen Zulauf- und Abflussrate einstellt. Der Wasserspiegel im Pumpenschacht wurde dabei konstant auf 10 cm unter Straßenniveau gehalten; die Pumprate stieg dabei stufenweise an. Bei der innenliegenden Referenzfläche wurde nach 1 h 09 min der stationäre Zustand mit einer Pumpleistung von 32 l/min erreicht. Das Messfeld 3 (geoSTON[®] protect anthrazit nach 1 h 00 min), Messfeld 5 (Prototyp N nach 1 h 0 min) und Messfeld 7 (Prototyp Tm nach 0 h 52 min) reagierten in ähnlicher Weise, wenngleich sich aufgrund einer gewissen Vorsättigung der Dränageschicht die Zeiten, ab wann sich ein stationärer Zustand einstellt, leicht verkürzen. Lediglich beim Messfeld 4 (drainSTON[®]) musste der Versuch abgebrochen werden, da die unterlagernde Tragschicht die Wassermenge nach ca. 25 min nicht mehr aufnehmen konnte und das Messfeld aufgrund des resultierenden Rückstaus überlief. Hiermit bestätigen sich die bereits nachgewiesenen geringeren Infiltrationsleistungen des Messfeldes 4 (Kap. 4.6.2).

4.11 Simulation von „clogging“-Effekten

Der „clogging“-Effekt beschreibt das sukzessive Zusetzen der Poren und Fugen mit Feinstaub aus dem Oberflächenabfluss befahrener Straßenflächen. Zur Simulation der „clogging“-Effekte auf der Versuchsfläche wurde jeweils eine definierte Menge an Quarzmehl (Milisil W11) auf das Messfeld gegeben (Abbildung 67). Das Erreichen des vollständigen Zusetzen der Poren und Fugen wurde definiert, wenn für die Infiltrationsrate Werte $< 100 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ erreicht wurden. In einigen Fällen wurde zusätzlich zum Milisil W11 noch ein feinkörniger Sand 1/1,2 hinzugegeben, da alleine durch das Milisil kein Zusetzen erreicht wurde. Die Messung und Auswertung der „clogging“-Effekte fand direkt nach den Messungen von Messfeldbelegung II am 25.01.2011 mittels Tropfenringinfiltrometer statt (Kapitel 4.6.2). Die Ergebnisse der einzelnen Messungen sind in Anhang 4.2 und Tabelle 17 dargestellt.

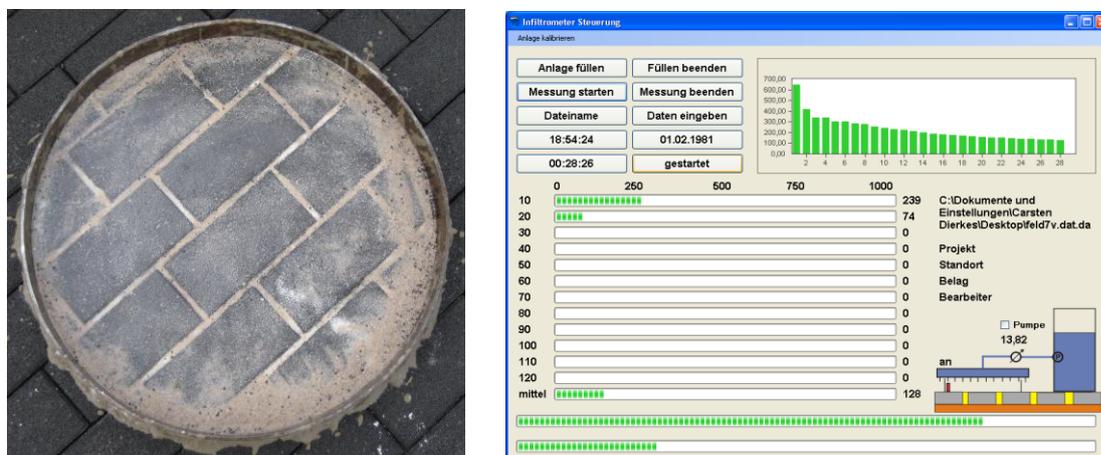


Abbildung 67: Tropfenringinfiltrometer-Versuch für den Nachweis von „clogging“-Effekten (links: Aufsicht einer künstlich zugesetzten Fläche; Rechts: EDV-Auswertung mit Beispiel für Flächen mit niedriger Infiltrationsrate).

Tabelle 17: Zusammenfassung der Infiltrationsraten ($l/(s\cdot ha)$) der sieben Messfelder nach x Minuten Messung (Minuten) mittels Tropfenringinfiltrometer (nach Erstellung, nach x Jahren Alter (Monate) und nach Zusetzen der Poren und Fugen mittels Milisil-Zugabe (l)). n.b.: nicht bestimmt.

Infiltrationsrate ($l/(s\cdot ha)$)	Messfeld 1	Messfeld 2	Messfeld 3	Messfeld 4	Messfeld 5	Messfeld 6	Messfeld 7
Messfeldbelegung I	Referenz	Tragschicht Niederlande	geoSTON® protect anthrazit	Feinere Tragschicht	Größere Tragschicht	Gefügedicht	Haufwerksporiger Rasengitterstein
22.07.2008	1620 (30)	1500 (30)	1200 (30)	1200 (30)	1580 (30)	920 (30)	950 (30)
Anforderungen	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt
Messfeldbelegung II	Referenz	Asphalt	geoSTON® protect anthrazit	drainSTON®	Prototyp N	Gefügedicht abgedichtet	Prototyp Tm
Alter (Monate)	30	15	30	16	16	30	16
25.01.2011	890 (30)	n.b.	830 (40)	400 (40)	1600 (20)	43 (30)	1690 (20)
Anforderungen	erfüllt	n.b.	erfüllt	erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
„clogging“ Zugabe Milisil (l)	0,45	n.b.	0,15	0,25	1,35 + 0,15 l Sand	n.b.	3 + 0,3 l Sand
25.01.2011	150 (40)	n.b.	20 (30)	35 (40)	75 (30)	n.b.	105 (40)
Anforderungen	nicht erfüllt	n.b.	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	n.b.	nicht erfüllt

Alle Messfelder, die der Simulation der „clogging“-Effekte unterzogen wurden, zeigten nach der Simulation Infiltrationsraten unterhalb von $270 l/(s\cdot ha)$ und erfüllen damit nicht mehr die Anforderungen der [FGSV98]. Die einzelnen Infiltrationsraten sind untereinander nicht vergleichbar, da unterschiedliche Mengen an Feinmaterial aufgebracht wurden. Bemerkenswert erscheint dennoch das Messfeld 7 mit Prototyp T. Obwohl die größte Menge an Feinmaterial aufgebracht wurde, zeigt die Fläche weiterhin Infiltrationsraten $> 100 l/(s\cdot ha)$. Ebenso zeigt die Referenzfläche 1 weiterhin vergleichbar hohe Infiltrationsraten mit $150 l/(s\cdot ha)$. Per selbst erstellter Definition zeigen diese beiden Messfelder keine Neigung zu „clogging“-Effekten.

4.12 Messung des Rutschwiderstandes

Die Untersuchung des Rutschwiderstandes wurde mit dem Gerät „floor slide control FSC2000print“ der Firma MCS Mechanik UG, Feldkirchen, durchgeführt. Dieses Messgerät (Gewicht 7,5 kg) zur Erfassung der Tritt- und Begehbarkeit von Fußböden fährt mit einem beschichteten Gleiter (Leder, Kunststoff, etc.) mit konstanter Geschwindigkeit von 0,2 m/s die zu messende Teststrecke ab und ermittelt präzise Messwerte über die Haft- und Gleitreibung von Bodenbelägen. Die Reibungskraft ist die Kraft, die benötigt wird, um einen Körper über eine Fläche zu ziehen. Der dimensionslose Reibungskoeffizient (Reibungszahl) μ gibt das Verhältnis zwischen der Zugkraft F_z und dem Gewicht G des Körpers an. Auf trockener Straße beträgt die Reibungszahl gegen einen Autoreifen $\mu = 0,45$ (auf vereister Straße $\mu < 0,2$). Für die Pflastersteinbeläge ergeben sich Unterschiede durch die Richtung der Fugen (paral-

lief zu den Längsfugen oder quer zu den Längsfugen) und die Feuchtigkeit der Flächen (trocken oder feucht).

Die Prüfung des Rutschwiderstandes auf den unterschiedlichen Pflastersteinbelägen erfolgte im relativen Vergleich. Die Prüfung der Messfelder des Geländeversuches I erfolgte am 13.07.2009. Die Messfelder, auf denen geoSTON® protect grau (Geog) verlegt wurde, zeigen im trockenen Zustand mit einem Kunststoff-Gleiter und einer Gleitstrecke von 60 cm längs zur Hauptfugenrichtung im Mittel $\mu = 0,73$ (mit einer Standardabweichung von 0,07 bei 18 Einzelwerten); im feuchten Zustand ergibt sich keine Veränderung (mit einer Standardabweichung von 0,05 bei 5 Einzelwerten). Quer zur Hauptfugenrichtung verringert sich der Wert auf $\mu = 0,71$ (mit einer Standardabweichung von 0,06 bei 16 Einzelwerten); im feuchten Zustand zeigt sich ebenfalls eine weitere geringe Verringerung auf $\mu = 0,64$ (mit einer Standardabweichung von 0,05 bei 5 Einzelwerten). Bei einer feineren Auflösung der Messwerte (247 Messwerte auf 60 cm) zeigen sich große Schwankungen der Reibungszahl zwischen $\mu = 0,19$ und $\mu = 0,91$ in Längsrichtung und etwas geringeren Schwankungen zwischen $\mu = 0,40$ und $\mu = 0,89$ in Querrichtung.

Die Messfelder, auf denen geoSTON® protect anthrazit (Geoa) verlegt wurde, zeigen im trockenen Zustand bei vergleichbaren Versuchsbedingungen längs zur Hauptfugenrichtung im Mittel $\mu = 0,62$ (mit einer Standardabweichung von 0,04 bei 10 Einzelwerten). Quer zur Hauptfugenrichtung verringert sich der Wert auf $\mu = 0,60$ (mit einer Standardabweichung von 0,04 bei 10 Einzelwerten).

Die Prüfung des Rutschwiderstandes für den Geländeversuch II erfolgte am 04.02.2011 im trockenen Zustand mit einem Leder-Gleiter über eine Gleitstrecke von 100 cm (ca. 140 Messwerte) längs zur Hauptfugenrichtung per Einfachmessung. Im relativen Vergleich der Messfelder untereinander ergeben sich nur geringe Unterschiede. Für den Asphalt (Messfeld 2) ergibt sich ein Mittelwert von $\mu = 0,52$ (mit Maximalwert von $\mu = 0,79$ und Minimalwert von $\mu = 0,32$). Für den drainSTON® (Messfeld 4) Wert ergibt sich ein Mittelwert von $\mu = 0,55$ (mit Maximalwert von $\mu = 0,74$ und Minimalwert von $\mu = 0,17$). Für den Prototyp N (Messfeld 5) ergibt sich ein Mittelwert von $\mu = 0,56$ (mit Maximalwert von $\mu = 0,74$ und Minimalwert von $\mu = 0,30$). Für den Prototyp Tm (Messfeld 7) ergibt sich ein Mittelwert von $\mu = 0,52$ (mit Maximalwert von $\mu = 0,69$ und Minimalwert von $\mu = 0,38$). Die Rutschwiderstände mit einem Leder-Gleiter fallen generell geringer aus im Vergleich zu einem Kunststoff-Gleiter. Im direkten Vergleich weisen der Asphalt und der Prototyp Tm die geringsten Rutschwiderstände auf. Im Vergleich zur maximalen Rauigkeit der Prototypen aus den Laborversuchen gehören die Prototypen Tm und N der Gruppe mit den geringen Rauigkeiten an (Kap. 3.2.4).

4.13 Messung der Infrarotstrahlung der Pflasterfläche

Die Messung der Infrarotstrahlung auf den Pflastersteinen des Geländeversuches II wurden mittels einer Wärmebildkamera Typ „TiR32“ der Firma Fluke am 26.08.2011 (10:15 Uhr, bewölkt, Lufttemperatur 22°C), 02.09.2011 (10:35 Uhr, sonnig, Lufttemperatur 24,5°C) und 30.09.2011 (11:20 Uhr, sonnig, Lufttemperatur 27°C) durchgeführt. Die Messungen wurden jeweils in der Übersicht mehrerer Messfelder

(Abbildung 68), im Vergleich von zwei oder drei benachbarter Messfeldern (Abbildung 69) und in der Großaufnahme der Einzelfläche (Tabelle 19) vorgenommen.

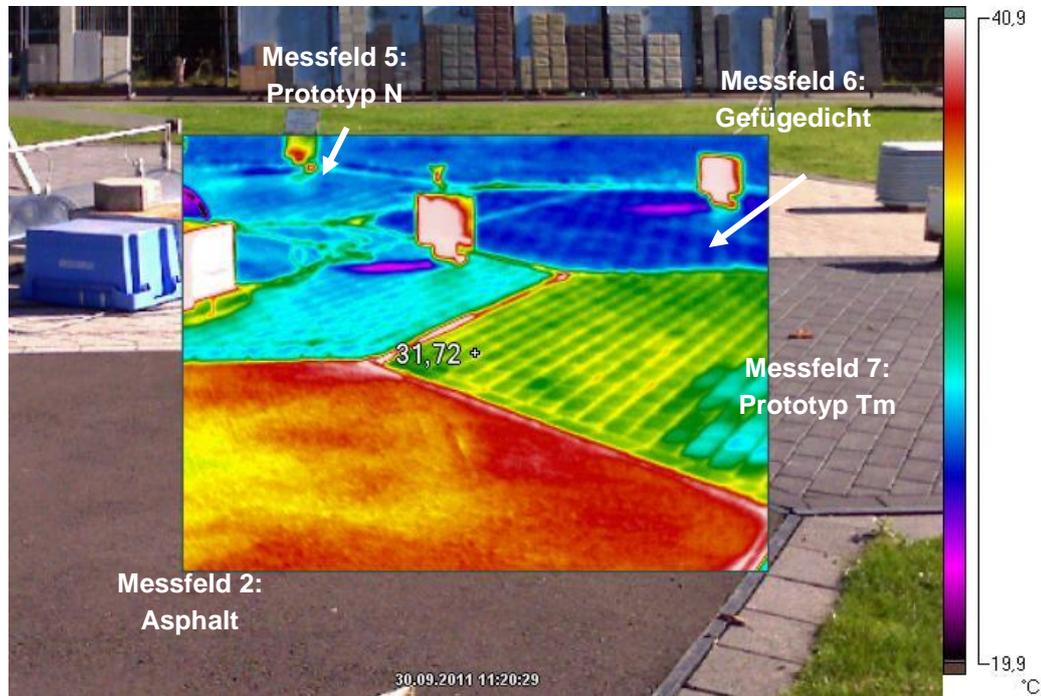


Abbildung 68: Übersicht über die Infrarotmessungen des Geländeversuches II am 30.09.2011.

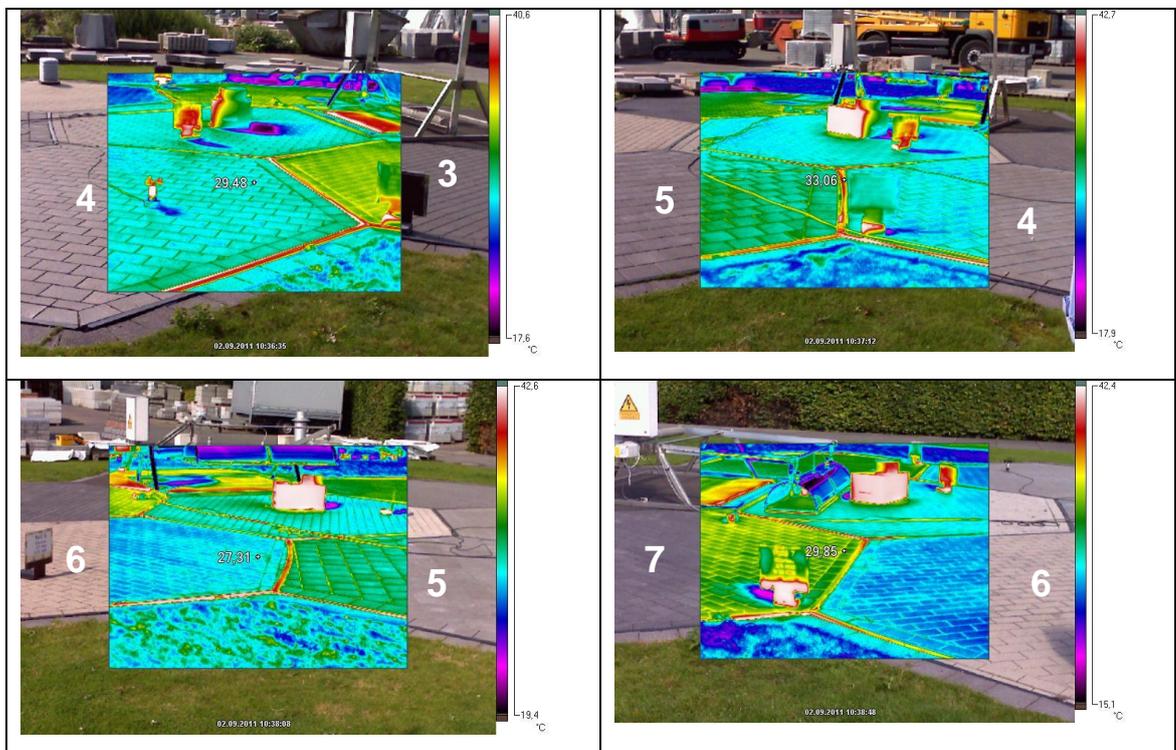


Abbildung 69: Infrarotmessungen benachbarter Messfelder des Geländeversuches II am 30.09.2011.

Die Oberflächentemperaturen sind sehr stark abhängig vom Wetter und den physikalischen Prozessen und erreichen niemals einen stabilen Zustand. Die Ergebnisse sind dennoch relativ miteinander vergleichbar. Zu allen drei Tagen weisen die Messfelder untereinander eindeutige und vergleichbare Unterschiede in der Oberflächentemperatur auf. Generell gilt für die drei Messungen die in Tabelle 18 aufgeführte Reihung der Messfelder mit abnehmender Oberflächentemperatur.

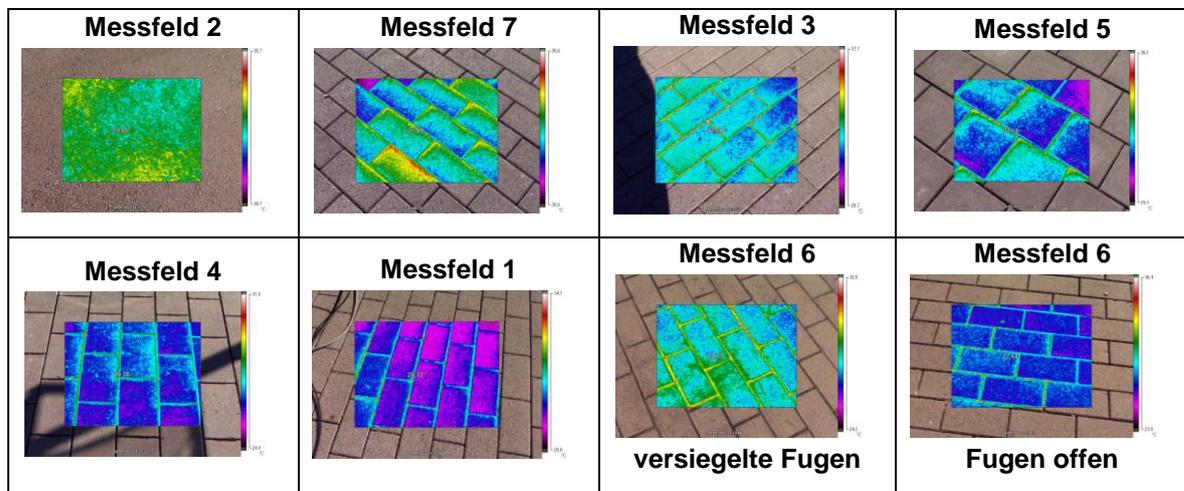
Tabelle 18: Ergebnisse der Infrarotmessung des Geländeversuches II. Die angegebenen Temperaturen entstammen der Messung im Großmaßstab vom 30.09.2011.

	Feld 2 Asphalt	Feld 7 Prototyp Tm	Feld 3 Geoa	Feld 5 Prototyp N	Feld 4 drainSTON®	Feld 1 Geog	Feld 6 Gefügedicht
Oberflächentemperaturen am 30.09.2011	33,5°C	31,9°C	32,1°C	31,2°C	29,3°C	29,7°C	28,3°C abgedichtet 27,5°C offene Fugen
	>	> oder =	> oder =	> oder =	=	>	
Temperaturleitfähigkeit [R11]	n.b.	1,27	1,14	1,00*	n.b.	1,18	1,31

*: Im Geländeversuch Anthrazit und im Laborversuch grau; nur eingeschränkt vergleichbar

Messfeld 2 mit Asphalt-Belag zeigt zu allen drei Witterungen die höchsten Oberflächentemperaturen. Messfeld 6 mit einem gefügedichten Flächenbelag zeigt zu allen drei Witterungen die niedrigsten Oberflächentemperaturen. Hierbei weist der Bereich mit den offenen Fugen und entsprechender Fugenritzen-Pflanzengesellschaft im Vergleich zum abgedichteten Bereich ohne entsprechender Fugenritzen-Pflanzengesellschaft geringere Oberflächentemperaturen auf. Die drei Anthrazit gefärbten Flächenbeläge (Messfeld 7, 3 und 5) bilden eine Gruppe mit höheren Oberflächentemperaturen im Vergleich zu den grau gefärbten Flächenbelägen (Messfeld 4 und 1). Das Messfeld 5 nimmt dabei eine Mittelstellung ein; der für den Prototyp N verwendete Anthrazit-Ton ist heller im Vergleich zu Messfeld 3 (Geoa) und Messfeld 7 (Prototyp Tm).

Tabelle 19: Ergebnisse der Infrarotmessung des Geländeversuches II im Großmaßstab vom 30.09.2011. Für jedes Bild gilt die eigene Skalierung der Oberflächentemperaturen.



Ein Vergleich mit den im Labor erfassten thermischen Eigenschaften (u.a. Temperaturleitfähigkeit [entspricht der Wärmediffusivität]) der Pflastersteine erlaubt weitere Aussagen. Die Temperaturleitfähigkeit ist ein Indikator für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wärme im Pflasterstein bei temporalen Temperaturschwankungen. Hohe Oberflächentemperaturen der Flächenbeläge in Verbindung mit einer hohen Temperaturleitfähigkeit der Pflastersteine führt theoretisch dazu, dass die Wärme schneller und tiefer in den Flächenbelag eindringen und gespeichert werden kann und somit die Verdunstung aus tieferen Bereichen des Pflastersteins und der Fuge begünstigen kann. Der Prototyp Tm zeigt im Vergleich zu den anderen Messfeldern die passende Kombination einer vergleichbar hohen Oberflächentemperatur und einer hohen Temperaturleitfähigkeit.

4.14 Versuchsrückbau

Die Versuchsfläche wurde im Rahmen des Projektes nicht zurückgebaut, da das Unternehmen Klostermann diese für weitere Projekte zur Verfügung stellen wird.

5 Bewertung der Geländeversuche

Die Bewertung der Messung der tatsächlichen Verdunstung im Gelände erfolgte durch den direkten Vergleich zwischen innen liegender Referenzfläche und außen liegendem Messfeld (oder im Fall des Feldes 4 und 5 ein direkter Vergleich untereinander). Dafür wurden die täglichen Verdunstungsraten der beiden Messfelder (Abbildung 60) im direkten Vergleich über alle ausgewiesenen Messperioden gegenübergestellt (Abbildung 70) und einer Korrelationsanalyse (Tabelle 20) unterzogen.

Wie bereits in [SGC11] beschrieben, ist der Einfluss der Wetterlagen und Wetterbedingungen an den Messdaten erkennbar. Aus diesem Grund zeigt Tabelle 20 für unterschiedliche Messperioden unterschiedliche Umrechnungsfaktoren gegenüber der innenliegenden Referenzfläche.

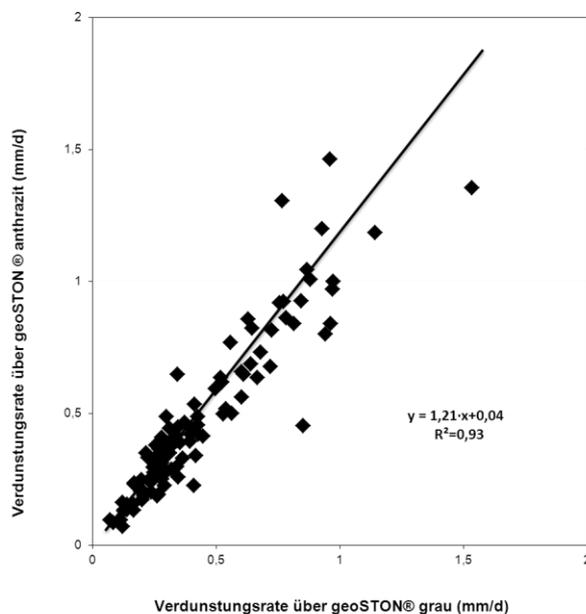


Abbildung 70: Exemplarische Korrelation der Verdunstungswerte zwischen den Messfeldern mit den Belägen geoSTON® protect grau (innenliegende Referenzfläche mit Geog) und geoSTON® protect anthrazit (Messfläche 3 mit Geoa). Angabe der Verdunstungsrate in mm/d.

Tabelle 20: Vergleichende Bewertung der Verdunstungsmessung für Geländeversuch I und Geländeversuch II. Die entsprechenden Messperioden sind Tabelle 16 zu entnehmen.

Außenliegende Messfelder Kurzbezeichn.	Messfeld 2 Tragschicht Niederlande	Messfeld 3 geoSTON® protect anthrazit	Messfeld 4 Feinere Tragschicht	Messfeld 5 Größere Tragschicht	Messfeld 6 Gefügedicht	Messfeld 7 Haufwerksporiger Rasengitterstein
Innenliegende Referenzfläche 1	geoSTON® protect grau (10/20/8) mit Basaltsplitt 1/3 in Fuge über HKS 2/5A als Bettung und HKS 0/32 als Tragschicht					
Geländeversuch I						
Korrelations- koeffizient	④⑥ 0,95	⑤⑦⑧①② 0,93	⑧15.06. – 12.07. 0,99		②③④ 0,97 genereller Trend 0,71 gesamt	③⑤ ¹¹ 0,57
Umrechnung Referenzfläche zu außen liegender Fläche	④⑥ Niederlande = 0,80 * grau feucht Mai 09 Niederlande = 5,00 * grau trocken Sept 08	⑤⑦⑧①② anthrazit = 1,21*grau - 0,04	⑧15.06. – 12.07. feinerer = 1,01 * gröber -0,01		②③④ Gefügedicht = 0,63*grau +0,02 Generell beim Regen umgekehrt	③⑤ ¹¹ Rasengitterstein = 6,23*grau-0,06
Geländeversuch II						
Außenliegende Flächen Kurzbezeichn.	Messfeld 2 Asphalt	Messfeld 3 geoSTON® protect anthrazit	Messfeld 4 drainSTON®	Messfeld 5 Prototyp N	Messfeld 6 Gefügedicht abgedichtet	Messfeld 7 Prototyp Tm
Korrelations- koeffizient	③②⑦ 0,89		③ 0,69 ⑧ 0,78	④ 0,97 ⑤ 0,75	①② 0,93	① 0,97 ⑥ 0,90
Umrechnung Referenzfläche zu außen liegender Fläche	③ Asphalt = 1,09*grau- 0,01 ② Asphalt = 1,05*grau- 0,02 ⑦ Asphalt = 1,25*grau		③ drainSTON = 1,38*grau - 0,03 ⑧ drainSTON = 1,71*grau - 0,03	④ N = 1,13*grau ⑤ N = 2,25*grau beeinflusst durch Regen	①② x = 0,71*grau +0,04	① T = 1,70*grau - 0,06 ⑥ 1,14*grau -0,01

Eine Variation der Trag- und Bettungsschicht hat keinen langfristigen Einfluss auf die Verdunstungsrate wie an der Variation der Korngrößenverteilung an Messfeld 4 und 5 ersichtlich. Kurzfristig starke Schwankungen zwischen trockenen und feuchten Witterungsbedingungen konnten allerdings am niederländischen Aufbau im Messfeld 2 festgestellt werden. Eine Veränderung der Farbe des Flächenbelages und damit eine Erniedrigung der Albedo in Messfeld 3 mit geoSTON® protect anthrazit erhöht die Verdunstungsrate gegenüber der Referenzfläche um den Faktor 1,21. Außerdem ist das Wasserhaltevermögen der Anthrazit gefärbten Vorsatzschicht der Pflastersteine höher. Für das Messfeld mit dem Rasengitterstein konnten um 6,23-fach hö-

here Verdunstungsraten festgestellt werden, die allerdings größeren Schwankungen unterliegen; dies ist am schlechten Korrelationskoeffizienten von 0,57 zu erkennen. Die höheren Verdunstungsraten sind auf das höhere Wasserhaltevermögen der Fugenfüllung sowie dem Grasbewuchs als aktive „Verdunster“ zurückzuführen.

Die gefügedichte Betonpflasterfläche zeigt direkt nach der Fertigstellung geringere Verdunstungsraten, da ein Großteil des Regenwassers noch in den Fugen versickern kann und damit nicht mehr der Verdunstung zur Verfügung steht. Der künstlich abgedichtete Zustand zeigt höhere Verdunstungsraten, da das Regenwasser nach einem Ereignis auf der Pflasterfläche in Mulden der abgedichteten Fugen zurückbleibt und damit der Verdunstung zur Verfügung steht. Ebenso ist der recht hohe Wert der Asphaltfläche zu bewerten. Der Asphalt wurde manuell ohne Gefälle eingebracht und nur unzureichend per Hand verdichtet. Dadurch stand auf der rauen Oberfläche nach einem Regenereignis eine unrealistische Menge an Wasser in den Kleinstmulden für die Verdunstung zur Verfügung.

Die höchsten Verdunstungsraten zeigen die optimierten Betonsteinpflaster Prototyp Tm und N sowie der drainSTON®. Der über die Fuge versickernde drainSTON® zeigt bei recht großen Schwankungen (Korrelationskoeffizient von 0,69 bis 0,78) eine Zunahme der Verdunstungsrate gegenüber der Referenzfläche um den Faktor 1,38 (Frühjahr) bis 1,71 (Herbst). Der Prototyp N zeigt generell eine geringe Zunahme der Verdunstungsrate gegenüber der Referenzfläche um den Faktor 1,13 (Frühsommer); allerdings besitzt dieser Prototyp sehr hohes Verdunstungspotential nach Regenereignissen mit einer Zunahme um den Faktor 2,25. Der Prototyp Tm zeigt bei sehr hohen Korrelationskoeffizienten die höchsten Zunahmen der Verdunstungsrate um den Faktor 1,7 gegenüber der Referenzfläche im Frühjahr und immerhin noch um den Faktor 1,14 höhere Verdunstungsraten in trockenen Sommermonaten.

Ein Vergleich der Gasreferenzverdunstung und der gemessenen aktuellen Verdunstung auf den Messfeldern und somit die Ableitung eines Korrekturfaktors ist leider nicht möglich (Kap. 4.7.6).

Für die erfassten Messperioden der Jahre 2008, 2009 und 2010 des Geländeversuchs I (Tabelle 16) betrug der kumulierte Gesamtniederschlag 566 mm. Dieser Wert ergibt sich aus den Monaten März bis November, in denen die Messung der aktuellen Verdunstung möglich war. Die für die erfassten Messperioden kumulativ ermittelte Verdunstung auf der innenliegenden Referenzfläche 1 beträgt 79 mm. Das entspricht im Mittel 14 % des kumulierten Gesamtniederschlages. In Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen wurden innerhalb der Messperioden für einzelne Monatsabschnitte maximale Verdunstungsanteile von 44 % vom Niederschlag und minimale Verdunstungsanteile von 7 % vom Niederschlag für die Referenzfläche mit einem geoSTON® protect grau erfasst.

Von dem mittleren langjährigen Jahresniederschlag (1961-1990) von 843 mm/a nehmen die Niederschläge in den Wintermonaten (Dezember bis Februar) 218 mm/a und in den übrigen Monaten (März – November) 625 mm/a ein. In den Wintermonaten Dezember bis Februar, in denen die Messung der aktuellen Verdunstung nicht möglich war, treten ohnehin aufgrund der allgemein niedrigen Temperaturen zu vernachlässigende Verdunstungswerte auf. Bezogen auf den mittleren langjährigen Niederschlag der Sommermonate in Höhe von 625 mm/a ergibt sich bei 14 % Ver-

dunstungsanteil eine mittlere langjährige Verdunstungsrate in Höhe von 88 mm/a. Bezogen auf den mittleren langjährigen Jahresniederschlag von 843 mm/a nimmt die Verdunstungsrate in Höhe von 88 mm/a einen Anteil von 10 % pro Jahr ein.

Tabelle 21: Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Verdunstungsmessung im Geländeversuch für ausgewählte Flächenbeläge.

Werte gelten für langjährige mittlere Niederschlagsrate von 843 mm/a in Coesfeld	Gefügedichter Betonpflasterstein (abgedichtet)	geoSTON® protect grau Referenzfläche	Optimierte Prototypen N und Tm + drainSTON®	Haufwerksporiger Rasengitterstein
Umrechnungsfaktoren gegenüber Referenzfläche (Tabelle 20)	0,71	1,0	1,70	6,23
Umrechnungsfaktor gegenüber einer alten Pflasterfläche	1,0	1,4	2,4	8,8
Verdunstungsrate (mm/a)	62	88	149	545
Anteil der Verdunstung am Jahresniederschlag (%)	7	10	18	65

Die anderen Flächenbeläge zeigen im Vergleich zur innenliegenden Referenzfläche veränderte Verdunstungsanteile (Tabelle 21), die in der anschließenden Wasserhaushaltsbilanzierung (Kap. 6) Eingang finden. Ein Flächenbelag mit einem grauen gefügedichten Betonpflasterstein, dessen Fugen nach mehrjähriger Nutzung weitestgehend abgedichtet sind, der aber über einen gewissen Anteil an einer Ritzenvegetation verfügt, besitzt einen Anteil der Verdunstung von 7 % am Jahresniederschlag. Mit dem Einsatz der verschiedenen optimierten Prototypen (z.B. drainSTON®, Prototyp N oder Prototyp T) kann der Anteil der Verdunstung am Jahresniederschlag auf 18 % erhöht werden. Bei der Verwendung eines Rasengittersteines erhöht sich dieser Anteil auf 65 %.

Bei einem Austausch des Flächenbelages einer alten Pflasterdecke einer Straße durch einen verdunstungsoptimierten Flächenbelag lässt sich der Verdunstungsanteil mit dem Faktor 2,4 mehr als verdoppeln (Tabelle 21).

Bei der Entwicklung der Prototypen für die Pflastersteine ergaben sich auch haufwerksporige Pflastersteine, die eine niedrige Verdunstungsrate (Abbildung 38; geringer als von wasserundurchlässigen gefügedichten Betonpflastersteinen), kombiniert mit einer hohen Wasserdurchlässigkeit, aufwiesen (Abbildung 71). Diese können in ariden Gebieten stellenweise durchaus zur Grundwasseranreicherung eingesetzt werden. Das versickerte Wasser wird hier weitgehend gegen Verdunstung geschützt, da die Steine eine Art Verdunstungssperre bilden. Es wäre auch denkbar, dass Straßenkörper als unterirdische Wasserspeicher fungieren [S11].

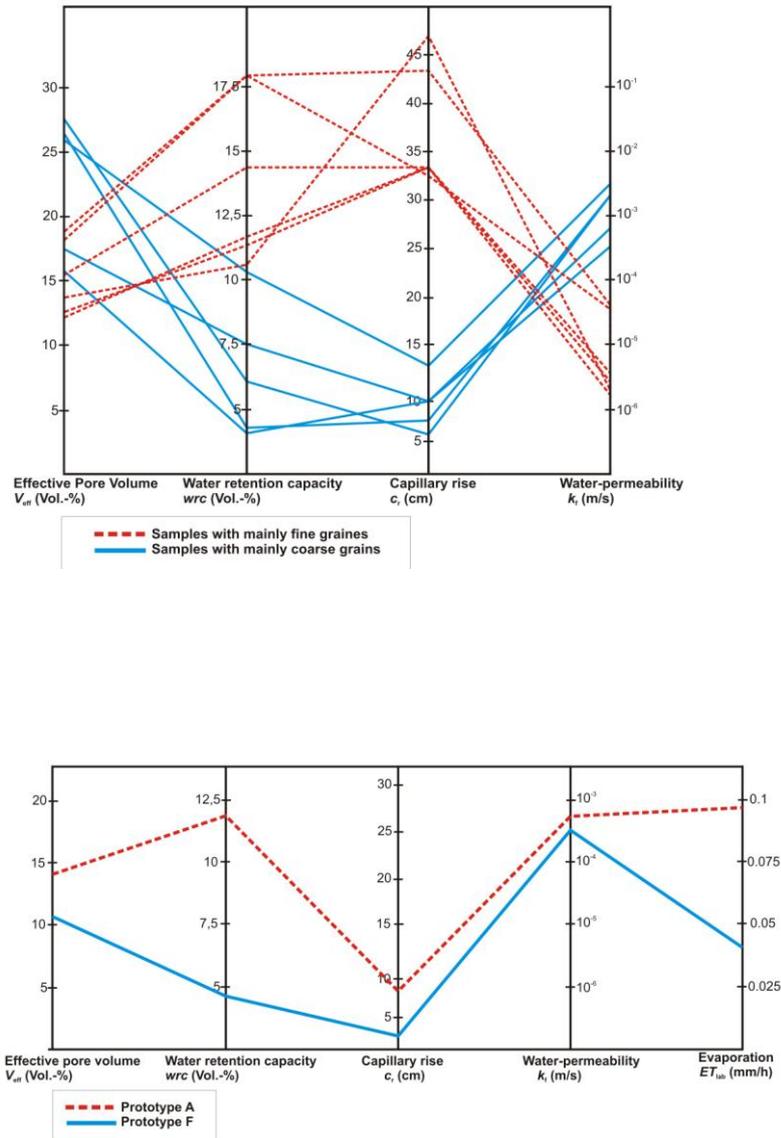


Abbildung 71: Vergleich der gemessenen Eigenschaften zwischen feinkörnigen (rot gestrichelte Linien) und grobkörnigen (blau durchgezogene Linien) Lockermaterialien (oben) und Pflasterstein-Prototypen (unten) [SGC10b].

6 Wasserhaushaltsbilanzierung

Die Wasserhaushaltsbilanzierung wurde auf der Grundlage der Ergebnisse der Geländeversuche I und II für das Stadtgebiet der Stadt Münster durchgeführt. Münster liegt 40 km entfernt von der Untersuchungsfläche in Coesfeld. Die Stadt Münster hat 250.000 Einwohner und liegt im Zentrum des Münsterlandes in Nordrhein-Westfalen. Münster liegt in derselben Klimazone wie Coesfeld mit vorherrschenden Westwinden. Die Jahresniederschläge liegen im langjährigen Mittel (1961-1990) etwas unterhalb von Coesfeld bei 757 mm/a. Das Gebiet wird nach [M97] der Klimazone 6 mit einer Jahresniederschlagsrate von 785 mm/a, einer potentiellen Verdunstung nach [T61] von 600 mm/a und einer Sommerniederschlagsrate von 409 mm/a zugeordnet. Im Stadtgebiet von Münster variiert der Untergrund sehr stark von Sandböden über Lehm- und Tonböden bis hin zu Lößböden mit variablen Flurabständen von < 1 m bis > 3 m. Im Bilanzierungsgebiet zeigen weite Bereiche Flurabstände von > 2 m und erfüllen somit die Anforderungen an den Einsatz von wasserdurchlässigen Pflasterstein-Belägen.

6.1 Berechnung der Wasserbilanz

Die Berechnung der Wasserbilanz wurde für das Stadtgebiet Münster mit dem Programm GwNeu [M11] in Anlehnung an [M97] durchgeführt. Die Methode nach [M97] ist eine Modifikation und Erweiterung der Methode nach [SW90] und basiert auf einem GI-System mit all seinen Funktionalitäten. [M97] hat für die Kalibrierung der Methode 15 unterschiedliche Bebauungsgebiete mit unterschiedlichem Versiegelungsgrad (Anteil der Befestigung in %) einer flächendifferenzierten Detailkartierung unterzogen. Für die Berechnung der Wasserbilanz wurden zu den vier folgenden Szenarien undurchlässige und an die Kanalisation angeschlossene Straßenflächen sowie Betonverbundpflasterflächen aus gefügedichten Betonsteinen gegen wasserdurchlässige und verdunstungsoptimierte Pflastersteine ausgetauscht:

- Szenario 1: repräsentative Bebauung des Ausgangszustandes
- Szenario 2: wasserdurchlässige und verdunstungsoptimierte Pflastersteine ersetzen Betonverbundsteine
- Szenario 3: wasserdurchlässige und verdunstungsoptimierte Pflastersteine ersetzen Betonverbundsteine und zusätzlich 15 % der bisher undurchlässigen Asphalt bzw. Betonflächen
- Szenario 4: wasserdurchlässige und verdunstungsoptimierte Pflastersteine ersetzen Betonverbundsteine und zusätzlich einen sinnvollen Anteil (zwischen 30 % und 100 %) der bisher undurchlässigen Asphalt bzw. Betonflächen

Die Verdunstung wurde für jedes Szenario für alle 15 Bebauungsgebiete auf fünf unterschiedlichen Böden mit vier unterschiedlichen Flurabstandsbedingungen basierend auf [M97] und den Ergebnissen der Geländeversuche neu berechnet (Abbildung 72). Generell zeigt die flächengemittelte Verdunstungsrate im urbanen Raum mit zunehmender Versiegelung eine Abnahme von 500 mm/a bei 20 % Ver-

siegelungsgrad auf 170 mm/a. Durch den Einsatz der wasserdurchlässigen und verdunstungsoptimierten Pflastersteine kann in Abhängigkeit von der Versiegelung die Verdunstungsrate um bis zu 40 % erhöht werden bzw. einer Reduzierung der Verdunstungsrate durch Bebauung kann entgegen gewirkt werden.

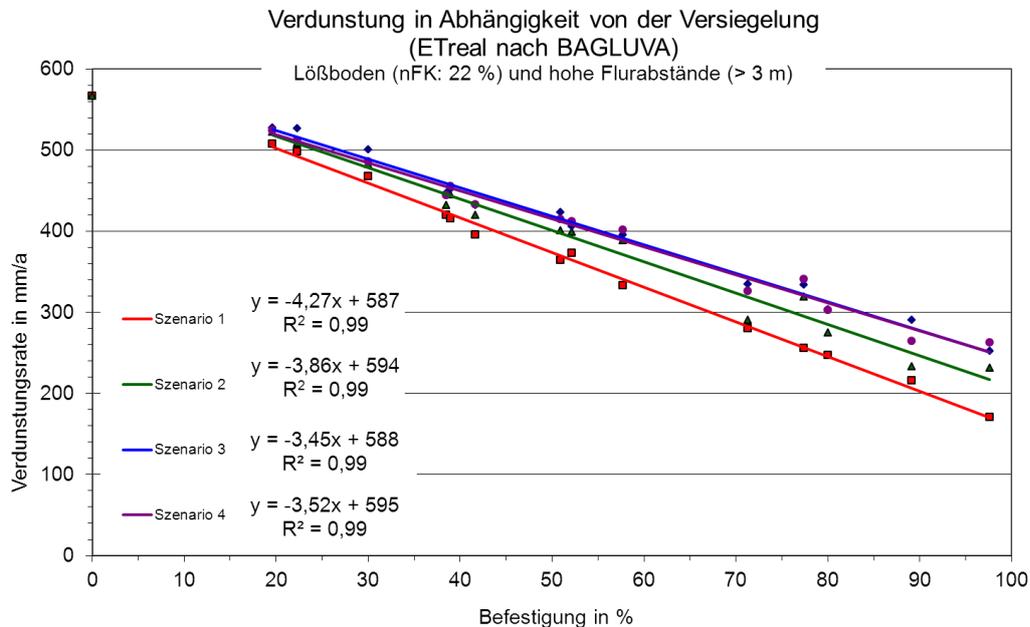


Abbildung 72: Darstellung der Verdunstungsrate in Abhängigkeit vom Versiegelungsgrad für vier Szenarien auf Lößböden (nutzbare Feldkapazität 22 %) mit hohen Flurabständen (größer 3 m).

6.2 Modellrechnung

Das Stadtgebiet von Münster mit einer Größe von 318,6 km² zeigt über weite Bereiche (77,1 %) einen Versiegelungsgrad von 0 % mit einer Mischvegetation, welche durch landwirtschaftliche Nutzung geprägt ist (grüne Flächen in Abbildung 73). Die weiteren Bereiche werden dominiert von der Kategorie „Versiegelungsgrad 41-60 % mit Mischvegetation“, die einen Flächenanteil von 20,2 % einnehmen (rote Flächen in Abbildung 73). Diese städtischen Bereiche stellen Wohngebiete mit Reihen- und Doppelhausbebauung, aber auch Innenstadtbereiche sowie Industriegebiete dar. Die gelben und orangen Flächen in Abbildung 73 repräsentieren hauptsächlich Kleingartenanlagen, Parks und Friedhöfe. Die Hauptstraßen und Autobahnen nehmen als alleinige Flächen einen Versiegelungsanteil von 61-80 % ein.

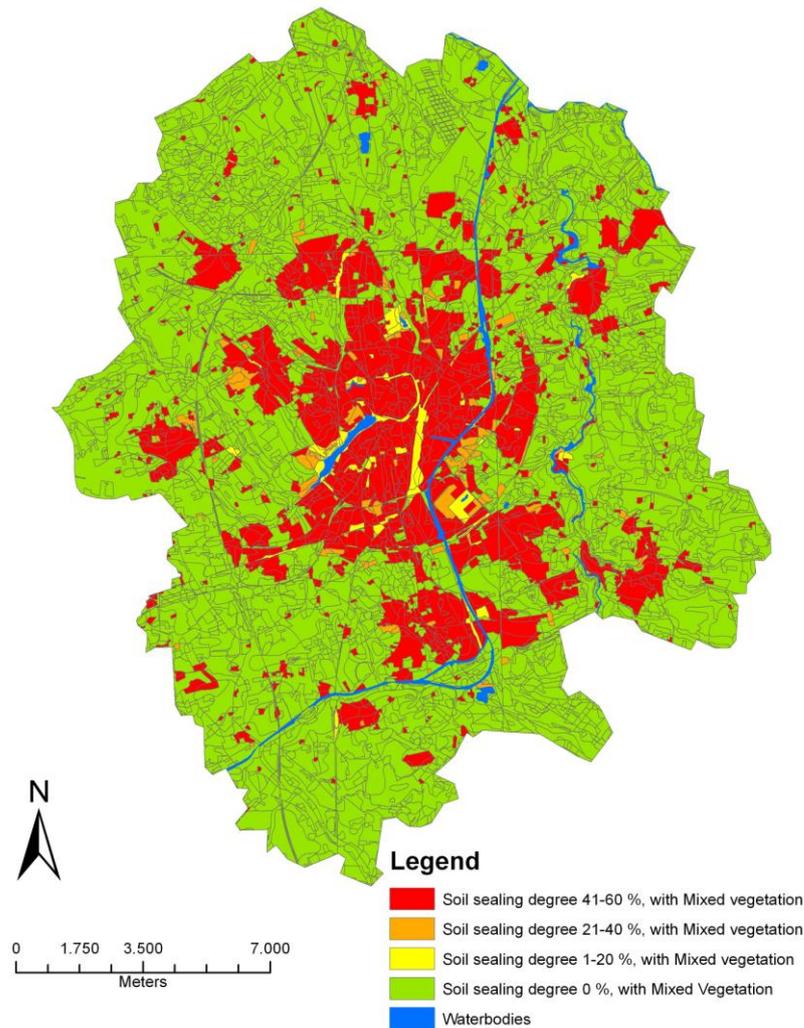


Abbildung 73: Kartendarstellung der Versiegelungsgrade im Stadtgebiet Münster.

Die Ergebnisse der flächendifferenzierten Wasserhaushaltsberechnung nach [M97] für das Stadtgebiet von Münster anhand der neuen Kalibrationsgeraden aus Abbildung 72 sind in Tabelle 22 dargestellt. In Münster (318,6 km²) liegen die repräsentativen Bebauungsgebiete (22,9 km²) mit einem Versiegelungsgrad von 41-60 % in der Klimazone 6.

Tabelle 22: Ergebnisse der flächendifferenzierten Berechnung der Verdunstung für das Stadtgebiet von Münster.

Beschreibung	Fläche (km ²)	Evapotranspiration		
		(mm/a)	(10 ⁶ m ³ /a)	($\Delta 10^{15}$ J/a = $\Delta PJ/a$)
Gesamte Stadtgebiet von Münster	318,6	489	155,8	
Repräsentative Bebauungsgebiete in Münster mit Versiegelungsgrad 41-60% in Klimazone 5 und 6 (Abbildung 73)	64,4	362,8	23,4	
Szenario 1 Repräsentative Bebauungsgebiete in Münster nur in Klimazone 6	22,9	363,5	8,31	0
Szenario 2	22,9	390,4	8,94	1,5*
Szenario 3	22,9	404,4	9,26	2,3*
Szenario 4	22,9	408,4	9,35	2,5*

* Für die Verdunstung von einem Liter Wasser werden ungefähr 2,45 MJ Energie benötigt; alle Werte gelten für Klimazone 6.

Gegenüber den repräsentativen Bebauungsgebieten kann ein Austausch der undurchlässigen und an die Kanalisation angeschlossene Straßenflächen sowie Betonverbundpflasterflächen aus gefügedichten Betonsteinen gegen wasserdurchlässige und verdunstungsoptimierte Pflastersteine eine Erhöhung der urbanen Evapotranspirationsraten von 25,9 mm/a bis zu 44,9 mm/a bedeuten. Das entspricht einer zusätzlich verdunsteten Wassermenge von 630.000 m³/a (Szenario 2) bis zu 1.040.000 m³/a (Szenario 4). Bei einer Abwassermenge der alleinigen Kläranlage der Stadt Münster von 60.000 m³/d entspricht dies einer Reduzierung der Wassermenge um 2.850 m³/d (ca. 5 %) und damit einer Erhöhung der Effizienz.

Die Erhöhung der Verdunstungsrate spiegelt sich ebenfalls in der Energiebilanz wieder. Durch die zusätzliche Verdunstung wird eine zusätzliche Energie von bis zu 2,5 PJ/a benötigt. Bei der Verdunstung geht dabei fühlbare Wärme in latente Wärme über, so dass die messbare Temperatur abnimmt und damit eine ebenso große Abkühlungsleistung erzielt wird. Wenn man davon ausgeht, dass für die Verdunstung von 1 Liter Wasser genauso viel Energie benötigt wird, wie für die Erwärmung von 100 m³ Luft um 18°C, dann könnte durch die beschriebene Maßnahme die Lufttemperatur der betrachteten Stadtfläche von 22,9 km² in den untersten 2 m mächtigen Luftschichten um 0,4°C weniger erwärmt bzw. abgekühlt werden. Der Wärmeinsel Stadt kann damit tendenziell zumindest zeitweise entgegengewirkt werden.

7 Ökonomische Betrachtung

7.1 Grundlagenermittlung

Im Rahmen eines Bauvorhabens in Coesfeld wurde ein Teilbereich der Parkplatzanlage in einer Größenordnung von 1.000 m², bestehend aus Stellplätzen und größeren Flächen nach drei Arten ausgeführt und untersucht:

- Ausführung Standard: Rechteckpflaster 20/10/8 cm
- Ausführung gehobener Standard: citySTON[®] 23/16/8 cm
- Ausführung nach Allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ): geoSTON[®] protect in 8 cm Stärke

7.2 Vorplanung / Entwurfsplanung / Ausführungsplanung

Die Vorplanung, Entwurfsplanung als auch die Ausführungsplanung wurden in Zusammenarbeit mit dem beauftragten Architekturbüro Dipl.-Ing. Andreas Bodem, 48653 Coesfeld und HKB durchgeführt und erstellt.

7.3 Massenermittlung

Die Massenermittlung wurde in einer Besprechung mit dem ausführenden Garten- und Landschaftsbauunternehmen M & O, 48727 Billerbeck auf der Grundlage des vorliegenden Bodengutachtens vorgenommen.

Aufgrund der ökologischen Bauweise (nach abZ) wurde auf eine Oberflächenentwässerung, wie sie bei den Ausführungen nach Standard und gehobenem Standard mit einem Netto-Volumen von je 7.437,50 € vorgenommen wurde, verzichtet.

7.4 Kostenermittlung baulicher Teile

Die Kosten der baulichen Teile, bezogen auf die Berechnung des Parkplatzes, verändern sich nicht. Lediglich die Kosten für die Oberflächenentwässerung entfallen bei einer Bauweise nach abZ.

7.5 Planung der Wartungs- und Unterhaltungsmaßnahmen

Derzeit wird eine Wartung und Inspektion jährlich und eine Reinigung der Pflasterfläche (nach abZ) im Zeitraum von 5 Jahren vorgesehen. Die Kosten belaufen sich auf ca. 250,00 €/1.000 m²/a für die Wartung/Inspektion sowie ca. 500,00 €/1.000 m² nach einem Zeitraum von je 5 Jahren für die Reinigung. Einsparungen ergeben sich in Höhe von ca. 560,00 €/a, bezogen auf eine Pflasterfläche von 1.000 m², aufgrund nicht anfallender Niederschlagswassergebühren. Ob die Niederschlagswassergebühren künftig höher ausfallen, liegt außerhalb des derzeitigen Kenntnisstandes.

8 Fazit

Die 19 verschiedenen Mineralstoffe erfüllen in fast allen Eigenschaften die Anforderungen im Straßenbau. Eine Variation der Mineralstoffe der Trag- und Bettungsschicht hat keinen Einfluss auf die Verdunstung im Gelände. Eine Variation der Mineralstoffe im Straßenaufbau sowie eine Variation der Mächtigkeit der Tragschicht haben großen Einfluss auf das Retentionsvermögen des Straßenaufbaus bei Starkregenereignissen und die daran anschließende verzögerte Versickerung in den unterlagernden Untergrund. Der wasserdurchlässig gestaltete Straßenaufbau kann mit einer 0,50 m mächtigen Tragschicht 65 l/m² bis 96 l/m² Regenwasser aufnehmen (bei einem maximalen Wasseraufnahmevermögen von 96 l/m² und einem Haltevermögen nach einem vorausgegangenem Regenereignis von 31 l/m²). Der weitere Versickerungsprozess ist abhängig vom Durchlässigkeitsbeiwert des Untergrundes. Für einen Untergrund aus einem mittleren Sand ergibt sich auch bei einem einfachen Bemessungsregen mit 26,2 mm in 10 min [Bemessungsregen $r_{10(0,2)}$ mit 1,62 l/(min·m²)] ein ausreichendes Restvolumen für ein nachfolgendes Regenereignis oder zur Ankopplung weiterer versiegelter Flächen (Erhöhung des Anschlussverhältnisses auf 1:4,5). Bei einer großräumigen Verwendung im urbanen Raum lässt sich eine Reduzierung von Hochwasserabflüssen, eine Unterstützung der Grundwasserneubildung in stark versiegelten Gebieten und eine Erhöhung der Niedrigwasserabflüsse von Gewässern erreichen.

Eine Variation der Mineralstoffe der Fugenfüllung hat einen großen Einfluss auf die Verdunstung. Das Extensivsubstrat zeigt im Labor annähernd so hohe Verdunstungswerte wie ein natürlicher Boden. Der Versickerungsprozess findet auch bei einem haufwerksporigen Betonpflasterstein nach wie vor über die Fuge statt. Die wenigen durchgängig offenen Poren der haufwerksporigen Betonpflastersteine leiten das Regenwasser zum überwiegenden Teil über seitlich austretende Porenöffnungen in tiefere Bereiche der Fuge, sodass ein oberflächennahes Zusetzen der Fugen und Poren durch Feinstaub („clogging“) nicht zwangsläufig eine komplette Aufhebung der Versickerungsleistung bedeutet.

Eine Variation der Eigenschaften der Pflastersteine hat die größten Auswirkungen auf die Verdunstung. Von 25 verschiedenen Prototypen zeigen die zweischichtigen Pflastersteine, bei denen die inneren Oberflächen durch auftreffendes Wasser möglichst stark benetzt wird, die höchsten Verdunstungsraten im Labor. Der verdunstungsoptimierte Pflasterstein sollte aus einer feinkörnigen, nicht oder kaum rauen, wasserdurchlässigen Vorsatzschicht und einem grobkörnigen, ebenfalls wasserdurchlässigen Kernbeton bestehen. Um die Verdunstungsraten weiter anzuheben, sollten möglichst Anthrazit gefärbte Pflastersteine sowie die Zementart CEM I verwendet werden, da diese scheinbar mehr Wasser für die spätere Verdunstung halten und die thermischen Eigenschaften beeinflussen können.

Alle Prototypen, die eine hohe Verdunstung zeigen, sind ebenso charakterisiert durch eine deutliche Differenz zwischen Temperaturleitfähigkeiten im gesättigten und trockenen Zustand, welche durch ebenfalls große Variationen in der Wärmeleitfähigkeit hervorgerufen werden. Obwohl in der Mikroskala die Gesteinskörnung hauptsächlich für die Energieübertragung in tiefere Bereiche verantwortlich ist, wird

die Energieübertragung in den haufwerksporigen Betonsteinen deutlich erhöht durch den Gehalt an Porenwasser, über das zusätzlich zum Beton weitere Kontaktpunkte für die Energieübertragung zur Verfügung gestellt werden. Dieser Effekt ist besonders deutlich beim Prototyp Tm mit einer 2 cm starken feinkörnigen Vorsatzschicht. Die Wärmeleitfähigkeit stellt den dominierenden Faktor zwischen 4 und 25°C dar. Da sowohl im Labor als auch an Sommertagen im Gelände die Oberflächentemperatur bis auf über 30°C ansteigt, wird die Verdunstung in der Mikroskala scheinbar sukzessive von der konvektiven Wärmeströmung (makroskopischer Auftrieb von warmen Wassermolekülen aufgrund der Dichteerniedrigung in der wässrigen Phase) sowie von der Dampfdiffusion in der Pore mit beeinflusst.

Im Zuge des Vorhabens wurde erstmalig die aktuelle Verdunstung ausgewählter Pflasterstein-Beläge direkt im Gelände gemessen. Gegenüber einem gefügedichten Pflasterstein (62 mm/a) zeigt eine wasserdurchlässig gestaltete Pflasterfläche mit bereits erhältlichen Pflastersteinen mit geoSTON[®] protect grau eine 1,4-fach höhere Verdunstung (88 mm/a). Die im Vorhaben optimierten Pflastersteinprototypen zeigen im Durchschnitt eine beinahe 2,4-fach höhere Verdunstungsrate (149 mm/a). Rasengittersteine zeigen im Vergleich dazu eine mehr als 8-fach höhere Verdunstung (545 mm/a). Damit erreicht eine Rasengittersteinfläche eine durchschnittliche tägliche Verdunstungsrate von 1,5 mm/d im Vergleich zu einem Straßenbegleitbaum mit 4 mm/d. Die verdunstungsoptimierten Pflasterstein-Beläge zeigen darüber hinaus eine gleichmäßigere Verdunstung nach einem Starkregenereignis.

Ein Teil des nach einem Regenereignis im Straßenaufbau verbleibenden Wassers wird über Verdunstung wieder an die Atmosphäre zurückgegeben. Gegenüber einem gefügedichten Pflasterstein-Belag, der einen Verdunstungsanteil von 7 % am Jahresniederschlag aufweist, kann ein wasserdurchlässiger und verdunstungsoptimierter Pflasterstein-Belag 18 % des Niederschlages verdunsten. Ein Rasengitterstein verdunstet 65 % des Jahresniederschlages.

Die derzeitig bundesweit verwendeten Abflussbeiwerte für ein wasserdurchlässiges Pflaster von 0,25 (d.h. 25 % des Jahresniederschlages fließt oberirdisch ab) und Rasengitterstein von 0,15 sind aufgrund der vorliegenden Ergebnisse zu hoch. Außerdem wird bisher die Verdunstungsrate von 30 % eines gefügedichten Pflasterstein-Belages bundesweit überschätzt; die vorliegenden Untersuchungen weisen hier nur 7 % nach. Demgegenüber werden die Verdunstungsraten eines wasserdurchlässigen Pflasters mit 8 % unterschätzt. Hier sollte zukünftig folgende Aufteilung auf die Wasserbilanzglieder verwendet werden: 18 % Verdunstung, 70 – 82 % Versickerung (in Abhängigkeit zum Durchlässigkeitsbeiwert des natürlichen Untergrundes) und 0 – 12 % Abfluss. Die Wasserbilanzglieder eines Rasengittersteins teilen sich zu 65 % Verdunstung, 35 % Versickerung und 0 % Abfluss auf.

Die Wasserhaushaltsbilanzierung einer Stadt ergab, dass gegenüber den repräsentativen Bebauungsgebieten ein Austausch der undurchlässigen und an die Kanalisation angeschlossene Straßenflächen sowie Betonverbundpflasterflächen aus gefügedichten Betonsteinen gegen wasserdurchlässige und verdunstungsoptimierte Pflastersteine eine Erhöhung der urbanen Evapotranspirationsraten von 25,9 mm/a bis zu 44,9 mm/a bewirken. Das entspricht einem zusätzlich verdunsteten Wasservolumen von 630.000 m³/a bis zu 1.040.000 m³/a. Bei einer Abwassermenge einer

Kläranlage von 60.000 m³/d (250.000 Einwohner) entspricht dies einer Reduzierung der Wassermenge um 2.850 m³/d (ca. 5 %) und damit einer Erhöhung der Effizienz. Die Erhöhung der Verdunstungsrate spiegelt sich ebenfalls in der Energiebilanz wieder. Durch die zusätzliche Verdunstung wird eine zusätzliche Energie von bis zu 2,5 PJ/a benötigt. Bei der Verdunstung geht dabei fühlbare Wärme in latente Wärme über, so dass die messbare Temperatur abnimmt und damit eine ebenso große Abkühlungsleistung erzielt wird. Wenn man davon ausgeht, dass für die Verdunstung von 1 Liter Wasser genauso viel Energie benötigt wird, wie für die Erwärmung von 100 m³ Luft um 18°C, dann könnte durch die beschriebene Maßnahme die Lufttemperatur der betrachteten Stadtfläche von 22,9 km² in den untersten 2 m mächtigen Luftschichten um 0,4°C weniger erwärmt bzw. abgekühlt werden. Der „Wärmeinsel“ Stadt kann damit tendenziell zumindest zeitweise entgegengewirkt werden.

Die ökonomischen Betrachtungen zeigen, dass eine Bauweise nach Allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) mit geoSTON[®] protect in 8 cm Stärke sinnvoll ist. Zum einen sind die Investitionskosten mit ca. 2.000 € günstiger als die Standard-Ausführung mit gefügedichtem Rechteckpflaster 20/10/8 cm und zum anderen entfallen bei einer Bauweise nach abZ die Entwässerungsgebühren mit ca. 0,56 €/Jahr.

Ein weiteres Potential für eine Verdunstungserhöhung steckt in technischen Innovationen in der Fertigungstechnik, um auch feinkörnige Prototypen in maschineller Serienproduktion zukünftig herstellen zu können. Ebenso könnte für wärmere Klimazone ohne Frosteinwirkung ein Prototyp (z.B. Prototyp V oder AA) mit offener Vorsatzschicht und dichtem Kernbeton weiter entwickelt werden. Ein besonderes Verdunstungspotential besitzen Pflastersteine mit einer gefügedichten Vorsatzschicht und einem grobkörnigen, wasserdurchlässigen Kernbeton in Kombination mit einer verdunstungsstarken Fugenfüllung.

9 Literaturverzeichnis

9.1 Literatur

- [B07] BLUM, W. E. H.: *Bodenkunde in Stichworten*. 6. Auflage, 179 S.; Gebr. Bornträger; Berlin, Stuttgart, 2007.
- [B08] BACKHAUS, K. ERICHSON, B., PLINKE, W., WEIBER, R.: *Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung*. 12. Auflage, 575 S.; Springer; Berlin, Heidelberg, 2008.
- [BÜ08] BÜHL, A.: *SPSS 16 – Einführung in die moderne Datenanalyse*. 11. Auflage, 897 S.; Pearson Studium, München, 2008.
- [B10] BERNS, E. M.: *Leitbahnen der Versickerung – Färbeversuche an wasser-durchlässigen Flächenbefestigungen*. Institut für Geologie und Paläontologie, WWU, B.Sc. Abschlussarbeit, IV+42 Seiten, 16 Abbildungen, 3 Tabellen und 1 Anhang (mit 14 Abbildungen + 1 Daten-CD); Münster, 2010.
- [BDB96] Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteileindustrie e.V.: *Richtlinie für die Herstellung und Güteüberwachung von wasserdurchlässigen Pflastersteinen aus haufwerksporigem Beton*, 7 S., überarbeitete Fassung 04/1996; Bonn, 1996.
- [BLfW05] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft: *Naturnahe Entwässerung von Verkehrsflächen in Siedlungen*. 40 S.; München, 2005.
- [BK05] BÁRDOSSY, A. & PAKOSCH, S.: *Wahrscheinlichkeiten extremer Hochwässer unter sich ändernden Klimaverhältnissen*. WasserWirtschaft, 2005 (7-8), 58-62; Wiesbaden, 2005.
- [BMU99] Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: *Hydrologischer Atlas von Deutschland*. Teil 1; Bonn, 1999.
- [BMU05] Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: *Hydrologischer Atlas von Deutschland*. Teil 4; Bonn, 2005.
- [D02] DÖRFLER, H.-D.: *Grenzflächen und kolloid-disperse Systeme*. 1. Auflage, 589 S.; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, 2002.
- [DifB06] Deutsches Institut für Bautechnik e.V.: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung - Zulassungsnummer Z-84.1-2*; Berlin, 2006.
- [DWA02] ATV-DVWK-M504: *Verdunstung im Bezug zur Landnutzung, Bewuchs und Boden*. 2002.
- [DWA05] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: *Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser*, DWA-A 138, 04/05, 2005.
- [DWAi06] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: *Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung*. DWA-A 100, 12/06, 2006.

- [DWA06] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: *Bemessung von Regenrückhalteräumen*, DWA-A 117, 04/06, 2006.
- [DWA07] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: *Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser*, DWA-M 153, 08/07, 2007.
- [E08] ECKSTEIN, P. P.: *Angewandte Statistik mit SPSS – Praktische Einführung für Wirtschaftswissenschaftler*. 6. Auflage, 367 S.; Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler; Wiesbaden, 2008.
- [F08] FAHRMEIR, L., KNEIB, T., LANG, S.: *Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen*. 2. Auflage, 501 S.; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, 2009.
- [F10] FEYEN, N.: *Saugspannungseffekte in haufwerksporigen Pflastersteinen*. Institut für Geologie und Paläontologie, WWU, B.Sc. Abschlussarbeit, X+52 S., 43 Abb., 48 Tab. im Anh.; Emmerich, 2010.
- [F10] FIRUS, F.: *Thermische Eigenschaften haufwerksporiger Betonpflastersteine*. Institut für Geologie und Paläontologie, WWU, B.Sc. Abschlussarbeit, VII+48 S., 46 Abb., 3 Tab., 6 Anh.; Bünde, 2010.
- [FBSLG02] FACHVEREINIGUNG BETONPRODUKTE FÜR STRAßEN-, LANDSCHAFTS- UND GARTENBAU E.V. 2002).
- [FGSV98] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Arbeitsausschuss Kommunalen Straßenbau: *Merckblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen*. Köln, 1998.
- [FGSV01] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn: *Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen - RStO 01*; Köln, 2001.
- [FGSV04a] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau: *Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau - TL Gestein-StB 04*; Köln, 2004.
- [FGSV04b] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau: *Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zu Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau - TL SoB-StB 04*; Köln, 2004.
- [FGSV04c] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Arbeitsausschuss Kommunalen Straßenbau: *Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau - ZTV SoB-StB 04*; Köln, 2004.
- [FGSV05] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.: *Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – TP BF-StB 05 Teil B 8.3*; Köln, 2005.
- [FGSV06] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau: *Technische Lieferbedingungen für*

- Bauprodukte zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen - TL Pflaster-StB 06*; Köln, 2006.
- [FOK06] FOKEN, T.: *Angewandte Meteorologie - Mikrometeorologische Methoden*. Springer-Verlag, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, 2006.
- [G10] GAUSEPOHL, F.: *Optimierung der Bewässerungstechnik zur Verdunstungsmessung an wasserdurchlässigen Pflastersteinen im Labor*. Institut für Geologie und Paläontologie, WWU, B.Sc. Abschlussarbeit, III+48 S., 46 Abb., 1 Anh.; Münster, 2010.
- [GC07] GÖBEL, P., DIERKES, C., KORIES, K., MESSER, J., MEIßNER, E., COLDEWEY, W. G.: *Einfluss von Gründächern und Regenwassernutzungen auf den Wasserhaushalt und Grundwasserzustand in Siedlungen*. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 12: pp. 189-200; 2007
- [GMC11] GÖBEL, P., STARKE, P., MEßER, J., COLDEWEY, W. G. (2011c): *A water sensitive city – Impacts on the urban water balance by the use of evaporation optimized pervious concrete pavements*. 12th International Conference on Urban Drainage. Porto Alegre. (submitted).
- [GSC08] GÖBEL, P., STARKE, P., COLDEWEY, W. G.: *Evaporation measurements on enhanced water-permeable paving in urban areas*. 11th International Conference on Urban Drainage. Proceedings. Edinburgh, 2008.
- [GV83] GRIMM, W.-D., VÖLKL, J.: *Rauhigkeitsmessungen zur Kennzeichnung der Naturwerksteinverwitterung*. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* Band 134, pp. 387 – 411; 1983.
- [H10] HOFERICHTER, T.: *Untersuchungen zur Versickerungsleistung und Speicherfähigkeit von wasserdurchlässig gestalteten Verkehrsflächen aus haufwerksporigen Pflastersteinen*. Institut für Geologie und Paläontologie, WWU, B.Sc. Abschlussarbeit, VI+36 S., 9 Abb., 12 Tab., 10 Anh.; Unna, 2010.
- [HC09] HÖLTING, B., COLDEWEY, W. G.: *Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. 7. Auflage, 383 s., 120 Abb, 90 Tab.; Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg, 2009.
- [HH09] HARTGE & HORN: *Die physikalische Untersuchung von Böden – Praxis, Messmethoden, Auswertung*. 4. Auflage, 178 S.; Schweizerbart; Stuttgart, 2009.
- [HK05] Hupfer, P., Kuttler, W.: *Witterung und Klima – Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie*. 11. Auflage, 554 S.; Teubner Verlag; Wiesbaden, 2005.
- [K99] KESEL, A. B., JUNGE, M. M., NACHTIGALL, W.: *Einführung in die angewandte Statistik für Biowissenschaftler*. 1. Auflage, 271 S.; Birkhäuser Verlag; Basel (Schweiz), 1999.
- [K08] KAUL, V.: *Gesteinsgeometrische Untersuchungen an Oberbaumaterialien zur Herstellung von wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen*. Geolo-

- gisch-Paläontologisches Institut, WWU, B.Sc. Abschlussarbeit, IX+29 S., 2 Abb., 5 Tab., 13 Anh.; Gronau, 2008.
- [K09] KRAMER, J.: *Wasserhaushaltsbilanzierung von wasserdurchlässig gestalteten Verkehrsflächen*. Geologisch-Paläontologisches Institut, WWU, B.Sc. Abschlussarbeit, IV+45 S., 10 Abb., 14 Tab., 2 Anh.; Göttingen, 2009.
- [K04] KUTTLER, W.: *Stadtklima – Teil 1: Grundzüge und Ursachen*. Beitragsreihe: Klimaänderungen und Klimaschutz, S. 187 – 199; 2004.
- [L03] LANGSRUD, O.: *ANOVA für unbalanced data: Use Type II instead of Type III sums of squares*. Statistics and Computing, Vol. 13, pp. 163 – 167; 2003.
- [M97] MEßER, J.: Auswirkungen der Urbanisierung auf die Grundwasser-Neubildung im Ruhrgebiet unter besonderer Berücksichtigung der Castroper Hochfläche und des Stadtgebietes Herne. DMT-Berichte aus Forschung und Wissenschaft, 58, 235 S.; Bochum, 1997.
- [M08] MEYER, M.: *Leitbahnen der Versickerung – Mikroskopische Analyse der inneren Struktur eines haufwerksporigen Pflastersteins*. Geologisch-Paläontologisches Institut, WWU, B.Sc. Abschlussarbeit, X+112 S., 25 Abb., 4 Tab., 2 Anh.; Münster, 2008.
- [M09] MAYER, M.: *Saugspannungseffekte in haufwerksporigen Pflastersteinen*. Institut für Geologie und Paläontologie, WWU, B.Sc. Abschlussarbeit, VII+46 S., 23 Abb., 8 Tab., 2 Anh.; Niebüll, 2009.
- [MUNLV05] Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. *Prüfung wasserdurchlässiger Flächenbeläge nach mehrjähriger Betriebsdauer*, Bochum, 2005.
- [N07] NEHLS, T.: *Water and Heavy Metal Fluxes in Paved Urban Soils*. Technische Universität Berlin, 128 S.; Berlin, 2007.
- [O00] OTTO, K.-H.: *Der Kreis Coesfeld – Lage und Naturraum*. In: GEOGRAPHISCHE KOMMISSION FÜR WESTFALEN [Hrsg.]: Städte und Gemeinden in Westfalen. Der Kreis Coesfeld (Bd. 7); Münster, 2000.
- [P97] PRINZ, H.: *Abriß der Ingenieurgeologie – mit Grundlagen der Boden- und Feldmechanik, des Erd-, Grund- und Tunnelbaus sowie der Abfalldeponien*. 3. Auflage, 546 S.; 84. Tab.; Ferdinand Enke Verlag; Stuttgart, 1997.
- [P10] PÖTZL, M.: *Der Vergleich von Verdunstungsraten von verschiedenen Flächen des urbanen Raumes*. Institut für Geologie und Paläontologie, WWU, B.Sc. Abschlussarbeit, IX+50 S., 35 Abb., 2 Tab., 1 Daten-CD.; Bocholt, 2010.
- [PS06] PRINZ, H., STRAUß, R.: *Abriss der Ingenieurgeologie*. 4. Auflage, 674 S.; Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg, 2006.
- [R11] RÖLVER, S.: *Geohydraulische und bodenphysikalische Untersuchungen an wasserdurchlässigen Pflastersteinen*. Institut für Geologie und Paläon-

- tologie, WWU, MSc. Abschlussarbeit, XIX+83 S., 52 Abb., 9 Tab., 2 Anh.; Coesfeld, 2011.
- [SS02] SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P.: *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Aufl., 570 S.; Heidelberg, 2010.
- [S10] SCHWENK, J., SCHIEKE, D., SCHUSTER, H., PFEIFER, E.: *Microsoft Excel 2010 – Das Handbuch*. 938 S.; O'Reilly Verlag GmbH & Co. KG; Köln, 2010.
- [S94] Simmer
- [S11] STARKE, P.: Aktuelle Verdunstung wasserdurchlässiger Flächebefestigungen. Institut für Geologie und Paläontologie, WWU, Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften, 71 S; Duisburg, 2011.
- [S08] STARKE, P.: *Hautwerksporige und wasserdurchlässige Verkehrsflächen als zweifacher Beitrag zum Hochwasserschutz – Verdunstungsmessungen am geoSTON[®] micro*. Institut für Geologie und Paläontologie, WWU, Diplomarbeit, VII+85 S., 22 Abb., 5 Tab.; Duisburg, 2008.
- [SC11] STARKE, P., WALLMEYER, C., RÖLVER, S., GÖBEL, P., COLDEWEY, W. G.: *Development of a new laboratory evaporation measurement device as decision support for evaporation-optimized building*. Building and Environment, 2011.
- [SGC10a] STARKE, P., GÖBEL, P., COLDEWEY, W. G.: *Urban evaporation rates for water-permeable pavements*. Water Science & Technology 62(5): 1161-1169, 2010.
- [SGC10b] STARKE, P., GÖBEL, P., COLDEWEY, W. G.: *Sustainable and climate-specific rainwater management by water-permeable pavements in the Middle East region*. 7th Annual International Symposium on Managed Aquifer Recharge proceedings, Abu Dhabi, 2010b.
- [SGC11] STARKE, P., GÖBEL, P., COLDEWEY, W. G.: *Effects on evaporation rates from different water-permeable pavement designs*. WST, 63.11: 2619-2627, 2 Abb., 2 Tab.; 2011.
- [SK94] SCHWERTER & KUNZE: *Erkundung und Sanierung von Altlasten*. Lehrbrief 3.13 der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Sozialwesen; Zittau, 1994.
- [SS02] SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P.: *Lehrbuch der Bodenkunde*. 15. Auflage, 593 S.; Spektrum; Heidelberg, Berlin, 2002.
- [SW93] SUKOPP, H. & WITTIG, R.: *Stadtökologie*. 2. Aufl.; Stuttgart, 1993.
- [T61] TURC, L.: *Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour*. Ann. Agron. **12**, 13–49; 1961.
- [UBA09] Umweltbundesamt 2009, Konzept für bundeseinheitliche Anforderungen an die Regenwasserbewirtschaftung

- [W00] WERNER, J.: *Die Erprobung einer Messanordnung zur Verdunstungsbestimmung an Grünland*. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 44(2):64-69, 2000.
- [W01] WESSOLEK, G.: *Bodenüberformung und -versiegelung*. Handbuch des Bodenschutzes, 11. Erg. Lfg. 04/01, 1-29; 2001.
- [Wens08] WENSING, H.: *Geohydraulische Untersuchung an haufwerksporigen Pflastersteinen*. Geologisch-Paläontologisches Institut, WWU, BSc. Abschlussarbeit, V+32 S., 13 Abb., 4 Tab., 23 Anh.; Havixbeck, 2008.
- [Wesc08] WESCHE, D.: *Geohydraulische Untersuchungen an Oberbaumaterialien zur Herstellung wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen*. Geologisch-Paläontologisches Institut, WWU, BSc. Abschlussarbeit, IX+48 S., 22 Abb., 2 Tab., 2 Anh.; Datteln, 2008.
- [WWS02] WEIß, J., WERNER, J., SULMANN, P.: *Erfahrungen mit dem „Tunnel“-Verdunstungsmesser beim Einsatz auf Grünflächen*. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 46(5):202-207, 2002.

9.2 Normen

- DIN 4021: *Baugrundaufschluss*, 1997-12.
- DIN 4022: *Baugrundaufschluss*, 1997-12.
- DIN 4049-3: *Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie*, 1994-10
- DIN 18124: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korndichte - Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer, Gaspyknometer*, 2011-04.
- DIN 18127: *Baugrund - Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch*, 1997-11.
- DIN 18130: *Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche*, 1998-05
- DIN 18132: *Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens*, 1995-12.
- DIN 18134: *Baugrund - Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch*, 2001-09.
- DIN 18196: *Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke*, 1997-12.
- DIN EN 933-1: *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren*, 2012-03.
- DIN EN 933-3: *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung der Kornform; Plattigkeitskennzahl*, 2006-01.
- DIN EN 933-4: *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung der Kornform – Kornformkennzahl*, 2008-06.

- DIN EN 933-5: *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 5: Bestimmung des Anteils an gebrochenen Körnern in groben Gesteinskörnungen*, 2005-02.
- DIN EN 933-8: *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 8: Beurteilung von Feinanteilen - Sandäquivalent-Verfahren*, 1999-05
- DIN EN 933-9: *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 9: Beurteilung von Feinanteilen - Methylenblau-Verfahren*, 2009-10.
- DIN EN 1097-6: *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme*, 2010-06.
- DIN EN 1338: *Pflastersteine aus Beton - Anforderungen und Prüfverfahren*, 2010-08
- DIN EN 1339: *Platten aus Beton - Anforderungen und Prüfverfahren*. 2003-08.
- DIN EN 1367-1: *Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel*, 2007-06.
- DIN EN 1744-1: *Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Chemische Analyse*, 2010-04.
- DIN EN 12371: *Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Frostwiderstandes*, 2010-07.

10 Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

10.1 Teilnahme der Projektteilnehmer an Tagungen

- Seminar *“Dezentrale Behandlung von Niederschlagsabflüssen – Status Quo und zukünftige Entwicklungen”*, 12. Mai 2011, Frankfurt
- 5th International Urban Ecology Congress, *“Cracks in the concrete Jungle”*, 22.-24. Oktober 2010, Berlin
- 7th Annual International Symposium on Managed Aquifer Recharge (ISMAR 7), 9.-13. Oktober 2010, Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate
- 7th International Conference NOVATECH 2010, *“Sustainable techniques and strategies in urban water management”*, 28.06.-1.07.2010, Lyon, Frankreich
- Drei-Länder-Jahrestagung der FH-DGG *„Grundwasser für die Zukunft“*, 12.-16. Mai 2010, Tübingen
- Tag der Hydrologie 2010 *„Nachhaltige Wasserwirtschaft durch Integration von Hydrologie, Hydraulik, Gewässerschutz und Ökonomie“*, 25.-26. März 2010, Braunschweig
- *„Arbeitskreis Regenwasser“*, Treff der städtischen Regenwasserbeauftragten der Em-scherregion, 25. August 2009, Essen.
- General Assembly of European Geoscience Union (EGU), 20.-24. April 2009, Wien, Österreich
- Tag der Hydrologie 2009 *„Hydrologische Systeme im Wandel“*, 26.-27. März 2009, Kiel
- International Symposium on Efficient Groundwater Resources Management *“The Challenge of Quantity and Quality for Sustainable Future”*, 16.-21. Februar 2009, Bangkok, Thailand
- FH-DGG-Fortbildungsveranstaltung *„Regenwasserversickerung“*, 22.+23.09.2008, Münster
- 11th International Conference on Urban Drainage (11ICUD), 31. August – 05. September 2008, Edingburgh, Scotland
- 7. Regenwassertage: Regenwasserversickerung, Regenwassernutzung, Regenwasserbehandlung. DWA, 02./03. Juni 2008, Schleswig.
- Tagung der FH-DGG *„Grundwasserressourcen – Charakterisierung, Bewirtschaftung, Prognosen“*, 21.-25. Mai 2008, Göttingen
- Internationale Fachmesse für Wasser-Abwasser-Abfall-Recycling (IFAT 2008), 5.-9. Mai 2008, München
- DWA-Expertengespräch *„Diffuse Stoffeinträge in Gewässer aus der Fläche unter natur-nahen Nutzungen und urbanen Freiflächen“*, 28. November 2007, Hennef
- Seminar der Hydrologischen Wissenschaften *„Verdunstung“*, 10.-11. Oktober 2007, Potsdam

10.2 Vorträge

- 22.09.2011 „Verdunstung urbaner Räume“, Präsenzwoche des Weiterbildungsstudiengangs „Wasser und Umwelt“ der Leibniz Universität Hannover
- 23.10.2010 “Increasing urban evaporation rates”, 5th International Urban Ecology Congress, “*Cracks in the concrete Jungle*”, 22.-24. Oktober 2012, Berlin
- 11.10.2010 “Sustainable and climate specific rainwater management by water-permeable pavements in middle east region”, 7th annual International Symposium on Managed Aquifer Recharge (ISMAR7), 9.-13. Oktober 2010, Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate
- 30.06.2010 „Effects on evaporation rates from different water permeable pavement designs”, 7th International Conference NOVATECH 2010, “*Sustainable techniques and strategies in urban water management*”, 28.06.-1.07.2010, Lyon, Frankreich
- 15.05.2010 „Naturangepasstes Konzept zur Regenwasser-Bewirtschaftung“, Drei-Länder-Jahrestagung der FH-DGG „*Grundwasser für die Zukunft*“, 12.-16. Mai 2010, Tübingen
- 07.10.2009 “Improvements of water-permeable pavements – evaporation rates”, Doktorandenretreat des Helmholtz Zentrums München, Scheyern
- 17.09.2009 „Verdunstung urbaner Räume“, Präsenzwoche des Weiterbildungsstudiengangs „Wasser und Umwelt“ der Leibniz Universität Hannover
- 25.08.2009 „Naturangepasste Regenwasserbewirtschaftung über wasserdurchlässig gestaltete Flächenbefestigungen/Verkehrsflächen - Grundlagenforschung / Anwendung“, Arbeitskreis Regenwasser - Treff der städtischen Regenwasserbeauftragten der Emscherregion, Essen
- 26.02.2009 „Concept of Near-Natural Storm Water Control in Urban Areas“, International Symposium on Efficient Groundwater Resources Management, 16.-21. Februar 2009, Bangkok, Thailand
- 08.11.2008 „Verdunstungsoptimierung wasserdurchlässiger Flächensysteme“, 18tes Doktorandentreffen, Darmstadt
- 22.+23.09.2008 „Naturangepasstes Regenwasserbewirtschaftungskonzept“, „Quantitative Aspekte der Regenwasserversickerung“, „Hydrogeologische Voraussetzungen für die Regenwasserversickerung“, FH-DGG-Fortbildungsveranstaltung „Regenwasserversickerung“, Münster
- 02.09.2008 “Evaporation measurements on enhanced water-permeable paving in urban areas”, 11th ICUD, Edinburgh, Schottland.
- 05.05.2008 „Naturangepasstes Regenwassermanagement in urbanen Räumen unter besonderer Berücksichtigung der quantitativen und qualitativen Aspekte des Grundwassers“, Vortragsprogramm der Wasserwirtschaftsinitiative NRW auf dem Messestand IFAT 2008, München

10.3 Abstracts

- STARKE, P. GÖBEL P., COLDEWEY W. G. (2010): Increasing urban evaporation rates. – New Perspectives on Urban Ecology, Proceedings, S. 46-47; Berlin. – [Vortrag]
- STARKE, P. GÖBEL P., COLDEWEY W. G. (2010): Sustainable and climate-specific rainwater management by water permeable pavements in the Middle East region. – 7th Annual International Symposium on management aquifer recharge (ISMAR 7), Abu Dhabi, 9.-13. Oktober 2010. – [Vortrag]
- STARKE, P. GÖBEL P., COLDEWEY W. G. (2010): Effects on evaporation rates from different water-permeable pavement designs. - NOVATECH 2010, Lyon, Frankreich, 10 S., 2 Abb., 2 Tab.; Lyon. – [Vortrag]
- STARKE, P., GÖBEL, P. & COLDEWEY, W.G. (2010): Anhebung urbaner Verdunstungsraten durch wasserdurchlässige Straßenbeläge. – Tag der Hydrologie 2010, Abstract book; Braunschweig. – [Poster]
- GÖBEL, P. (2010): Naturangepasstes Konzept zur Regenwasser-Bewirtschaftung. – SDGG, 67: S. 123. – [Vortrag]
- STARKE, P., GÖBEL, P., COLDEWEY, W.G. (2010): Verminderung der Grundwasserneubildung unter wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen mittels Verdunstungsanhebung. - SDGG, 67: S. 233. – [Poster]
- STARKE, P., GÖBEL, P. & COLDEWEY, W.G. (2009): Development of an evaporation-optimized water permeable pavement. – Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-4631-1. – [Poster]
- STARKE, P., GÖBEL, P. & COLDEWEY, W.G. (2009): Verdunstungsoptimierung wasserdurchlässiger Straßenaufbauten. – Tag der Hydrologie 2009, Abstract book, S. 74-75; Kiel. – [Poster]
- GÖBEL, P., COLDEWEY, W.G. (2009): Concept for near-natural storm water control in urban areas. – International Symposium in efficient groundwater resources management (IGS-TH 2009), 16.-21. February 2009, abstract book, p. 62-63, 1 fig.; Bangkok, Thailand. – [Vortrag]
- GÖBEL, P., STARKE, P. & COLDEWEY, W.G. (2008): Evaporation measurements on enhanced water permeable pavings in urban areas. – 11th International Conference on Urban Storm Drainage (11ICUD), 31. August - 05. September 2008; Edinburgh (Scotland). – [Vortrag]

10.4 Veröffentlichungen

- STARKE, P. GÖBEL P., COLDEWEY W. G. (2011): Effects on evaporation rates from different water-permeable pavement designs. – WST, 63.11: 2619-2627, 2 Abb., 2 Tab.
- STARKE, P. WALLMEYER, C., RÖLVER, S., GÖBEL P., COLDEWEY W. G. (2011): Development of a new laboratory evaporation measurement device as decision support for evaporation-optimized building. – Building and environment 46(2011): 2552-2561, 5 Abb., 1 Tab. – [doi: 10.1016/j.buildenv.2011.06.010]

- GÖBEL, P. & COLDEWEY, W.G. (2010): Concept for near-natural storm water control in urban areas. – Environmental Earth Science, 6 S., 1 Abb.. – [doi: 10.1007/s12665-010-0852-4]
- STARKE, P., GÖBEL, P., COLDEWEY W.G. (2010): Urban evaporation rates for water-permeable pavements. – Water Science and Technology – WST, 62.5: 1161-1169, 3 Abb., 2 Tab. – [doi: 10.2166/wst.2010.390]

10.5 Messebeteiligungen

- 6. Außenwirtschaftstag NRW in Münster. Teilnahme als Aussteller am Messestand der Arbeitsstelle Forschungstransfer der Universität Münster, 21. September 2010.
- ecogerma 2009: Trade Fair and Congress on Sustainable Technologies. Teilnahme mit Poster und als Aussteller am Messestand des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, 12.-15. März 2009. São Paulo, Brasilien.
- Bochumer Tag des Wassers, Forumveranstaltung des Umwelt- und Grünflächen- sowie des Tiefbauamtes Bochum, Messestand, 2. April 2008, Bochum

10.6 Besucher auf der Versuchsfläche

- **Delegationen der Städte Doetinchem und Bronckhorst (Vorden)**, Niederlande.
- **Justus-Liebig-Universität, Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement** (Prof. Dr. Hans Georg Frede, Professur für Ressourcenmanagement, Prof. Dr. Stefan Gäth, Professur für Abfall- und Ressourcenmanagement, 15 Doktorandinnen und Doktoranden)
- **Ingenieursbureau L.B.A.**, Groenlo, Niederlande.
- **North Carolina State University, Biological and Agricultural Engineering** (Ass. Prof. Dr. William F. Hunt, Leiter der “Storm water research group”)
- **Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Arbeitsstelle Forschungstransfer** (Dr. Wilhelm Bauhus)
- **Emschergenossenschaft im Oktober 2009** (Dipl. Ing. Michael Becker, Abteilungsleiter Wasserwirtschaft, Dipl. Ing. Brigitte Spengler, Regenwasserbewirtschaftung)
- **Generalkonsulat Brasilien** (Honorarkonsul Dieter Gerling)
- **Senator der thailändischen Regierung** (Mr. Pichai)
- **Diverse Besuche im Rahmen von Betriebsführungen der Fa. Klostermann**

10.7 Weitere Pressearbeit

ECOGERMA 2009 – Sao Paulo

Münstersche Forschung in Brasilien

WWU präsentiert Zukunftstechnologien in São Paulo

Münster (upm), 13. März 2009



Erfolgreiche Begegnung in São Paulo: Achim Zickler (BMBF), Sandra Wiegand, Phillip Starke, Sergio Machado Rezende (Minister für Wissenschaft und Technologie), Dr. Daniel Klein, Bundesministerin Annette Schavan und Daniel Rugerio Bonenkamp. Foto: BMBF

Auf der „Ecogerma 2009“ in São Paulo, der ersten deutsch-brasilianischen Messe für Nachhaltigkeitstechnologien, präsentiert die WWU noch bis Sonntag (15. März) ihre Forschung zu diesem Thema anhand ausgewählter Projekte. Auf der Messe informierte sich bereits das Büro des Bürgermeisters von São Paulo bei dem münsterschen Landschaftsökologen Phillip Starke über eine Forschungsk Kooperation der Firma Klostermann aus Coesfeld und dem Geologisch-Paläontologischen Institut der WWU im Bereich der Hydrogeologie: Es wurde ein wasserdurchlässiger Pflasterstein entwickelt, der Schadstoffe wie Schwermetalle und Kohlenwasserstoffe zurückhält und in der regenreichen Megastadt São Paulo vielseitig zum Einsatz kommen kann. Dr. Daniel Klein, Forscher am Internationalen Institut für Wald und Holz NRW (Wald-Zentrum der WWU), bietet Struktur- und Markt-Analysen besonders für kleine und mittelständische Unternehmen an. Er zeigt ihnen, wie sie vom Kohlenstoffdioxid-Emissionshandel profitieren. Bereits am ersten Tag konnten auf der „Ecogerma“ Kontakte zur Wald- und Forstwirtschaft Brasiliens geknüpft werden. Weitere Forschungsprojekte, die vorgestellt werden, sind die nachhaltige Kautschukgewinnung aus Löwenzahn durch Dr. Christian Schulze-Gronover und Prof. Dr. Dirk Prüfer vom Institut für Biochemie und Biotechnologie der Pflanzen, die Brennstoffzellenforschung durch Prof. Dr. Mario Ohlberger vom Institut für Numerische und Angewandte Mathematik und die Wasserstoffherzeugung aus Grünalgen durch Prof. Dr. Michael Hippler vom Institut für Biochemie und Biotechnologie der Pflanzen.

Bundesministerin Annette Schavan eröffnete die Messe am Donnerstag mit den Worten: „Angesichts der weltweiten Wirtschaftskrise müssen wir gerade jetzt in Zukunftstechnologien investieren. Umwelttechnologien schaffen zweierlei: Sie sind ein sehr guter Weg, um den steigenden Herausforderungen beim Klimawandel und beim Umweltschutz gerecht zu werden. Und sie sind ein rasant wachsender Markt, von dem deutsche Unternehmen besonders profitieren können.“ Mehrere Abkommen zur verstärkten Kooperation beim Wissenschaftler-Austausch und zur Zusammenarbeit bei der beruflichen Bildung wurden unterzeichnet. Die Ministerin bekräftigte die Wichtigkeit und das hohe Potenzial der bilateralen Kooperationen und kündigte für 2010 das „Deutsch-Brasilianische Forschungsjahr“ an. Noch am selben Tag weihte Frau Schavan den ersten Abschnitt eines Deutschen Wissenschafts- und Innovationshaus in der Außenhandelskammer São Paulo ein. Mit Dependancen in São Paulo, Moskau, Neu Deli und Tokio werden die Deutschen Wissenschafts- und Innovationshäuser, im Rahmen der Internationalisierungsstrategie und der Außenwissenschaftspolitik der deutschen Bundesregierung eingerichtet.

Die Universität Münster pflegt bereits seit Jahren aktive Partnerschaften an Hochschulen und Unternehmen in Brasilien. Die Arbeitsstelle Forschungstransfer (AFO) der WWU unterhält seit Langem enge Beziehungen zur Außenhandelskammer São Paulo. Daher freuten sich Sandra Wiegand, Projektkoordinatorin, und Daniel Rugerio Bonenkamp, Mitarbeiter im Bereich „Latin American Affairs“, besonders über die Teilnahme an der feierlichen Eröffnung des Deutschen Wissenschafts- und Innovationshaus São Paulo und an der Messe vom 12. bis zum 15. März teilzunehmen. Im Anschluss an die „Ecogerma“ wird die WWU-Delegation die Partnerhochschule Universidad São Paulo besuchen.

[ECOGERMA 2009 AFO](#)

Ausblick 2009 > 70 | 71

> „Forschungsprojekt Evaporation“ –
Regionalökonomische Kooperation

Seit November 2007 arbeiten die Angewandte Geologie der WWU und die Firma Heinrich Klostermann Betonwerke GmbH & Co. KG aus Coesfeld in einem DBU-geförderten Projekt zusammen: Ein wasserdurchlässiger Pflasterstein kann seit 2006 bundesweit zur Regenwasserbehandlung genutzt werden. Der Stein hält Schadstoffe wie Schwermetalle und Kohlenwasserstoffe zurück. Alle 10 bis 15 Jahre wird der Stein mit einer speziellen Maschine gereinigt.

Das Projekt entwickelt diesen Pflasterstein weiter: Das im Stein zurückgehaltene Wasser soll verstärkt verdunsten, um so das Stadtklima zu fördern und die Regenwasserkanalsysteme zu entlasten. Die höhere Verdunstung wird erreicht, indem Körnung, Zusammensetzung und Farbe des Steins sowie die Schottermaterialien darunter verändert werden.

Auf der EcoGerma 2009 in São Paulo wird dieses Projekt vorgestellt. In Brasilien werden bisher kaum innovative Straßenbeläge wie dieser Pflasterstein eingesetzt.

> Research Project Evaporation – an example
for a regional economic cooperation

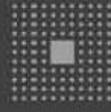
One of the projects that will be presented at the stand of the BMBF on behalf of the AFO, will be the research project Evaporation. Since November 2007, the Institute for Applied Geology and the Heinrich Klostermann Betonwerke GmbH & Co. KG from Coesfeld, work together on this DBU promoted project: A water permeable paving stone, which was developed by Klostermann in 2006 and is already in use nationwide for rainwater purification and managing harmful substances like heavy metals and hydrocarbon. The cooperation project improved the paving stone. By changing the grain size, composition and colour of the stone, as well as the underlying gravel materials, the water held back with in the stone can evaporate more effectively. This improvement enhances the city climate and relieves the sewerage system. In Brazil, which has recently been hit by floods, such innovations have, up to now, hardly been introduced. This research cooperation will be displayed at the EcoGerma 2009 in São Paulo.



Philipp Starke, Institut für Angewandte Geologie der WWU, (rechts) erläutert Dr. Wilhelm Bauhus, AFO, Methoden der Verdunstungsmessung auf Pflastersteinen der Firma Klostermann in Coesfeld.

Philipp Starke, Institut for Applied Geology, at the WWU, (right) explains methods of evaporation measurement on paving stones of the Klostermann Company in Coesfeld to Dr. Wilhelm Bauhus, AFO.

Projektpartner / project partner:



KLOSTERMANN



Auszug aus dem Jahrbuch 2010 der Forschungstransferstelle der WWU Münster, AFO

Fahrgäste ganz aus dem Häuschen

Viele beschwerten sich über die neuen Wartehallen, weil sie nicht wind- und regenfest sind



Die neue Halle an der Haltestelle Brunnenweg ist nur 84 Zentimeter tief, wie ein Griff zum Maßband zeigt. Fotos: ton

Von Matthias Tonhäuser

Die neuen Buswartehäuschen, die die Wall AG in Absprache mit der Stadtverwaltung in Münster aufgestellt hat, sorgen für Ärger. Viele Fahrgäste bemängeln, dass sie nur wenig Schutz gegen Wind und Regen bieten.

MÜNSTER. Die Temperaturen sind niedrig, aber Volkes Zorn kocht trotzdem hoch: Der Fotograf hat gerade sein Stativ aufgebaut, als Katharina Winnefeld an ihn herantritt. „Wollen Sie über die Wartehäuschen berichten“, fragt sie. Als er bejaht, ist sie fast nicht mehr zu bremsen: „Der Regen trifft direkt auf die Bank“, klagt sie, „und der Wind kommt auch von überall.“ Weitere Passanten stimmen ihr zu: „Das ist nichts Halbes und nichts Ganzes“, sagt eine 41-jährige Frau, „da sollte man lieber gar nichts hinstellen.“

Keine Einzelfälle. Stadtwerke-Sprecherin Sigrid Bäumer berichtet, dass sich schon „etliche“ Fahrgäste über die neuen Wartehallen beschwert haben. Die Stadtwerke haben keine andere Wahl, als sie an die Stadt zu

verweisen. Die Stadt hatte Anfang 2009 einen Vertrag mit der Wall AG geschlossen, demzufolge sie die Hallen für 15 Jahre aufstellen und betreiben darf.

Ratsherr Gerhard Joksch (Grüne), der auch Mitglied im Aufsichtsrat der Stadtwerke ist, berichtet, dass man im Gremium nachgefragt habe, ob das Nahverkehrsunternehmen beteiligt worden sei. „Die Antwort war: ‚Nein, das sind wir nicht.‘ Die Stadtwerke haben Hinweise gegeben, die sind aber nicht in die Konstruktion der Wartehallen eingeflossen.“ Er bemängelt, dass die Häuschen nicht nur zum Teil zu schmal sind, sondern dass es auch bei der breiten Variante durch die Ritzen zieht.

Bei der Stadt ist das Problem bekannt. Stadtdirektor Hartwig Schultheiß sprach es selbst im Planungsausschuss an. Die Stadt hat der Wall AG erlaubt, 363 Wartehallen sukzessive durch Modelle mit Werbevitrinen auszutauschen. Die Firma stellt sie auf, unterhält sie, darf dafür aber auch die Werbeeinnahmen behalten. 220 Häuschen an weniger at-

traktiven Standorten sind im Eigentum der Stadt geblieben. Insgesamt gibt es rund 1000 Haltestellen in Münster.

Das eigens für die Domstadt entwickelte Modell gibt es in zwei Varianten: einer normalen (1,75 Meter tief) und einer schmalen. Sie wurde überall dort aufgestellt, wo neue Sicherheitsbestimmungen nichts anderes zulassen. Diese 41 schmalen Häuschen sind offiziell 99 Zentimeter tief, wer nachmisst, kommt auf 84. „Wir wollen überprüfen, ob wir an manchen Standorten nicht doch normale Häuschen aufstellen können“, kündigt Schultheiß' Referent Reinhard Adams an.

Und die Wall AG? Die ist mit den schmalen Hallen anscheinend genau so unzufrieden, wie die Fahrgäste. „Es war eine Entscheidung der Stadt, die schmalen Häuschen aufzustellen“, sagt Sprecherin Frauke Müller. Die Stadt Münster habe noch nicht den Wunsch geäußert, einzelne Hallen auszutauschen. „Wir würden reagieren, wenn das an uns herangetragen wird“, sagt Müller.

Perfektes Pflaster

Uni-Geologen wollen mit neuem Stein Stadtklima verbessern

Von Jan-Philipp Jenke

MÜNSTER. Er ist dunkelgrau, porös, etwas rau und hat zwei Schichten. Geologen der Uni Münster haben mit Forschungsgeldern der Deutschen Bundesstiftung Umwelt den angeblich perfekten Pflasterstein entwickelt. „Die genaue Rezeptur wird nicht verraten“, sagt Privatdozentin Dr. Patricia Göbel. Dabei kann man den optimalen Stein gar nicht so genau charakterisieren. „Wir können für jedes Klima den passenden Stein anfertigen“, so die Hydrogeologin.

Die Vorteile gegenüber dem herkömmlichen Verbundpflaster sind beeindruckend: reduzierte Hochwassergefahr, besseres Stadtklima und eine Unterstützung des Grundwassers. Wie das alles funktioniert? Ganz einfach. Asphaltierte und gepflasterte Flächen versie-

geln in vielen Flächen große Teile des Bodens. „Das Wasser fließt oberirdisch ab. Bei Starkregen kann es zu Überlastungen der Kanalisationen und Überschwemmungen der Flüsse kommen“, erklärt Göbel das Problem. Dies verhindert der neu entwickelte Pflasterstein, indem er nicht nur das Wasser versickert und speichert, sondern nach und nach auch wieder verdunstet – „mehr als das 2,4-fache, was normale Verbundsteine leisten können“. Das habe vor der Arbeitsgruppe aus Münster noch niemand gemessen. Der positive Nebeneffekt der Verdunstung: „Sie sorgt im Sommer für ein kühleres Klima in den Städten. Es ist weniger schwül.“ Eine Info darf bei der Eisekälte draußen natürlich nicht fehlen: Der Stein ist frostsicher.

In der Herstellung ist er

zwar teurer, aber „in der Relation ein Nullnummernspiel“. Denn großflächig in Städten und Straßen eingesetzt, könne er vielerorts eine zusätzliche Regenwasserrückhaltung überflüssig machen und so Kosten sparen. Auf Parkplätzen von Supermärkten wird er beispielsweise schon eingesetzt. Weitere Chancen für ihren Stein sieht Göbel in Neubaugebieten.

Außerdem könne in Zukunft auch Regenwasser von den Dachflächen über die Straßen in den Boden oder zurück in die Atmosphäre gelangen. Allerdings seien an diesem Punkt manche Stadtverwaltungen ziemlich sperrig, da ihnen eine Einnahmequelle versiegt. „Die Kommunen müssen über ihre Abwassergebührenordnungen nachdenken“, fordert Göbel Veränderungen im Sinne der Umwelt.



So sieht er aus: Geologin Patricia Göbel zeigt das Ergebnis ihrer Forschungen. Foto: jpp

Der richtige Untergrund

Geologen: Pflasterstein für ein besseres Stadtklima

Der optimale Pflasterstein ist laut Hydrogeologin Dr. Patricia Göbel dunkelgrau, hat eine raue Oberfläche und ist aus zwei porösen Schichten aufgebaut – er ist also bis in die kleinste Pore genau durchdracht. Die Privatdozentin aus der Arbeitsgruppe Angewandte Geologie hat ihn mit entwickelt. Sie erklärt die Bedeutung der Forschung: »Würde man mehr Straßen in den Städten mit solchen Steinen pflastern, könnte man vielerorts auf eine zusätzliche Regenwasserrückhaltung in Versickerungslagen oder auf Rückhaltebecken verzichten und damit Kosten sparen.«

Asphaltierte und gepflasterte Flächen versiegeln in vielen Städten große Teile des Bodens. Niederschlag kann so nicht mehr auf natürliche Weise ins Grundwasser versickern. Stattdessen wird er über die Kanalisation abgeleitet. »Bei Starkregen kann es zu Überlastungen der Kanalisationen und Überschwemmungen der Flüsse kommen. Dieses Problem wird sich in Zukunft verschärfen, weil wir durch den Klimawandel immer häufiger mit lokalen Starkregenereignissen rechnen müssen«, betont die Geologin Patricia Göbel.

Die Wissenschaftlerin und ihre Mitarbeiter haben jüngst ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt über vier Jahre gefördertes Projekt abgeschlossen, bei dem es darum ging, einen optimierten Pflasterstein zu entwickeln, der nicht nur wasserdurchlässig ist, damit Wasser versickern kann, sondern der auch Wasser speichert und nach und nach wieder an die Umgebungsluft abgeben kann. »Die Verdunstung sorgt für Kühlung und verbessert so das Stadtklima«, erklärt Patricia Göbel.

Es gibt unzählige Stellschrauben, an denen die Forscher gedreht haben – angefangen von der Größe der Poren im Betonstein, welche

das Wasser aufnehmen und dosiert wieder abgeben, über die Struktur der Oberfläche, welche die Verdunstung beeinflusst, bis hin zur Farbe: Eine dunkle Oberfläche begünstigt die Verdunstung, da sich dunkle Flächen schneller erwärmen. Dazu kamen die Eigenschaften des Fugenmaterials. Bei allen Verbesserungen waren die Wissenschaftler an die engen Grenzen gebunden, die der Straßenbau vorgibt. Dazu gehört beispielsweise die Griffigkeit der Fahrbahn. Die Entwicklungen der Forscher beruhen auf Messdaten: »Wir sind die Ersten, die tatsächlich die Verdunstung von der Straße gemessen haben«, betont Patricia Göbel.

Das Projekt, das einst von Prof. Wilhelm Georg Coldewey vom Institut für Geologie und Paläontologie ins Leben gerufen wurde, führten die Forscher in Zusammenarbeit mit der Firma Klostermann aus Coesfeld durch. Beteiligt waren Dr. Philip Starke, der seine Promotion dem Thema gewidmet hat, sowie zahlreiche Studierende. Auf der Basis eines »Ausgangsmodells« der Firma Klostermann, das Schadstoffe, beispielsweise Schwermetalle, aus dem Regenwasser herausfiltern kann, haben die münsterschen Forscher verschiedene optimierte Pflasterstein-Prototypen entwickelt.

Die Vision von Patricia Göbel ist ein naturnaher Wasserhaushalt in den Städten, bei dem Regenwasser auch von den Dachflächen über die Straße in den Boden oder zurück in die Atmosphäre gelangt. Ein wasserdurchlässiges Straßenpflaster soll dazu beitragen – neben anderen Bausteinen, beispielsweise Grünflächen, die die Verdunstung stärker erhöhen als jedes Pflaster. »Nichts reguliert das Stadtklima so gut wie Pflanzen«, sagt Patricia Göbel. »Dazu gehören selbst die Pflänzchen in den Fugenritzen im Pflaster.«

CHRISTINA HEIMKEN



Dunkelgrau, rau, porös – so soll er sein, der optimale Pflasterstein. Foto: Klostermann

...rfung in Kalifornien stellen in der Erd-...
... sind. In einigen...
...ng kommt es des-...
...starken Erdbeben,...
...nzen an anderen...
...e Brüche aneinan-...
...Forscherteam mit...
...chael Becken, der...
...versität Münster...
...igt, dass es einen...
...en den Prozessen...
...und denen in gro-...
...rt, wo Fluide...
...den Tiefen des...
...in oberflächenna-...
...önnen, gleiten die...
...größere Brüche...
...en anderen Berei-...
...leitmittel, weil die...
...chlässige Gesteins-...
...gehindert werden...
...ieder zu niederfre-...
...n in Tiefen von 20...
...durch die unter...
...iefe eingeschlosse-...
...rden. Die Beob-...
...nahme, dass Flui-...
...on Erdbeben eine...
...latur: 480, 87–90

...g des Emissions-...
...ehr wird weltweit...
...Kostengründen...
...US-Luftfahrge-...
...e Studie des Mas-...
...Technology unter...
...tes Dr. Robert...
...r Verkehrswissen-...
...l aus den Segeln...
...ren sagen sogar...
...s profitieren, weil...
...CO2-Ausstoß auf...
...können.