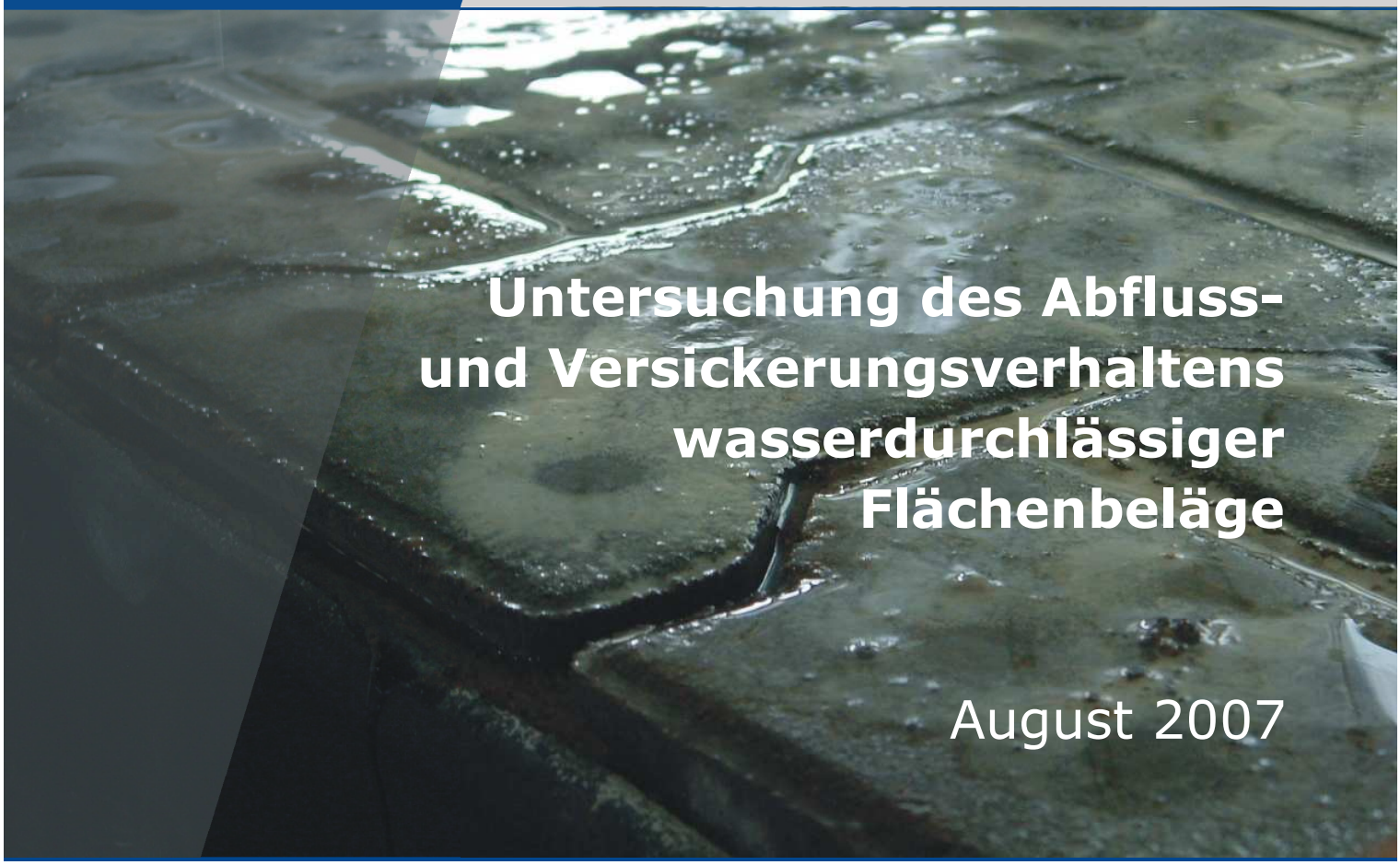
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN

Kurzfassung



Untersuchung des Abfluss- und Versickerungsverhaltens wasserdurchlässiger Flächenbeläge

August 2007

Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Technische Universität Kaiserslautern

in Kooperation mit

IKT- Institut für Unterirdische Infrastruktur
Gelsenkirchen

SIWAWI

IKT

Projekttitel

Untersuchung des Abfluss- und Versickerungsverhaltens wasserdurchlässiger Flächenbeläge

Aktenzeichen

IV – 9 – 042 236 0020

Bearbeitung

Technische Universität Kaiserslautern
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Prof. Dr.-Ing. T. G. Schmitt
PD Dr.-Ing. habil. A. Welker
Dipl.-Ing. M. Illgen

Paul-Ehrlich-Straße 14
D – 67663 Kaiserslautern

in Kooperation mit

IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur
Dr.-Ing. Bert Bosseler
Dipl.-Ing. (FH) Kathrin Harting
Dipl.-Ing. Thomas Brüggemann

Exterbruch 1
D – 45886 Gelsenkirchen

Auftraggeber

Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV)

Schwannstraße 3
D – 40476 Düsseldorf

Ministerium für Umwelt
und Naturschutz, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz des
Landes Nordrhein-Westfalen

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ..... **I**

Abbildungsverzeichnis ..... **II**

Tabellenverzeichnis ..... **III**

1 Einleitung **1**

1.1 Hintergrund und Zielsetzung 1

1.2 Vorgehensweise 2

2 Grundlagen und Kenntnisstand **3**

2.1 Flächenbefestigungen in Siedlungsgebieten 3

2.2 Kenntnisstand zum Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger Pflasterbauweisen 4

3 Material und Methoden **6**

3.1 Untersuchungsmethodik der Feldmessungen an Bestandsflächen 6

3.2 Untersuchungsmethodik der Laborversuche 8

4 Ergebnisse und Diskussion **11**

4.1 Infiltrationsversuche an Bestandsflächen 11

4.2 Beregnungsversuche im Labor 16

4.2.1 Fugenarm verlegte Pflasterbeläge aus gefügedichten Betonsteinen 16

4.2.2 Fugenarm verlegte Plattenbeläge 20

4.2.3 Pflasterbeläge mit aufgeweiteten Sickerfugen 23

4.2.4 Poröse Pflasterbeläge aus haufwerksporigen Betonsteinen 25

4.3 Charakterisierung des Versickerungsprozesses anhand der Untersuchungsergebnisse 27

4.4 Mathematische Beschreibung des Versickerungsprozesses auf wasserdurchlässigen Flächenbelägen 31

4.4.1 Konzeption des Berechnungsmodells 31

4.4.2 Infiltrationsmodul 33

4.4.3 Speichermodell 36

5 Anwendungsempfehlungen für die Urbanhydrologie **38**

5.1 Abflussbeiwerte zur Dimensionierung entwässerungstechnischer Anlagen 38

5.2 Parameterwerte im Berechnungsansatz nach Horton 45

6 Zusammenfassung und Fazit **51**

7 Literatur **54**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Lysimeteranlage 9

Abbildung 2: Untersuchungsflächen am Standort Lingen 11

Abbildung 3: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an fugenarmem Standardpflaster aus gefügedichten Betonsteinen 12

Abbildung 4: Anfangs- und Endinfiltrationsraten der vier am Standort Lingen untersuchten Pflastertypen 13

Abbildung 5: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an Sickerfugenpflaster mit splittgefüllten Sickerkammern 14

Abbildung 6: Bandbreite der in Straelen und Kevelaer gemessenen Versickerungsraten an Pflasterbelägen aus haufwerksporigen Betonsteinen 15

Abbildung 7: Flächenbeläge aus fugenarmem Doppelverbund- und Rechteckpflaster 17

Abbildung 8: Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei mäßigem sowie bei ausgeprägtem Kolmationsgrad in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität (2,5% Gefälle) 18

Abbildung 9: Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters in Abhängigkeit von Beregnungsintensität, Kolmationsgrad und Gefälle (D = 15 min) 18

Abbildung 9: Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten 20

Abbildung 10: Infiltrationsverläufe der untersuchten Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten im Neuzustand (Gefälle 2,5%) 21

Abbildung 11: Infiltrationsverläufe der untersuchten Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten im Gebrauchszustand (Gefälle 2,5%) 21

Abbildung 12: Flächenbeläge aus Betonsteinen mit splittverfüllten Sickerfugen 23

Abbildung 13: Sickerabflussraten eines Pflasterbelages mit splittverfüllter Sickerfuge von 10 mm Breite bei unterschiedlichen Quarzmehlmengen (Beregnungsintensität 300 l/(s·ha) 24

Abbildung 14: Flächenbeläge aus porösen Betonsteinen 26

Abbildung 15: Schema des bi-direktionalen Schichtenmodells 32

Abbildung 16: Korrelation zwischen Infiltrationsrate und Niederschlagsintensität am Beispiel eines fugenarmen Verbundpflasters mit 2,5% Gefälle für die Dauerstufe D = 20 min 33

Abbildung 17: Gegenüberstellung gemessener und errechneter Infiltrationsraten für einen Plattenbelag mit einem Fugenanteil von 1,8% bei einer Regendauer von D = 30 min 36

Abbildung 18: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenarm verlegte Plattenbeläge (Fugenanteil ≤ 3%) 40

Abbildung 19: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenarm verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 3%-6%) 41
Abbildung 20: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenreich verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 6%-12%)....42
Abbildung 21: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für Pflasterbeläge mit splittgefüllten Fugen oder Kammern (Fugenanteil 6%-12%) 43
Abbildung 22: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für poröse Pflasterbeläge aus haufwerksporigen Betonsteinen 44
Abbildung 23: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für Flächenbefestigungen aus Rasengitter und Schotterrasen....45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gängige Arten wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen 3
Tabelle 4: Bandbreite des in der Fachliteratur angegebenen Versickerungsvermögens wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen im Gebrauchszustand 5
Tabelle 5: Übersicht der Untersuchungsflächen der Infiltrometermessungen 7
Tabelle 6: Übersicht der Versuchsserien am Lysimeter....10
Tabelle 7: Zahlenwerte der Modellparameter des Infiltrationsmodells für einen fugenarmen Pflasterbelag für verschiedene Kolmationsgrade 34
Tabelle 8: Abminderungsfaktoren ζJ der Infiltrationsrate in Abhängigkeit vom Oberflächengefälle 35
Tabelle 9: Empfohlener Wertebereich der Anfangsversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei deutlicher Kolmation 47
Tabelle 10: Empfohlener Wertebereich der Anfangsversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei mäßiger Kolmation....47
Tabelle 11: Empfohlener Wertebereich der Endversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei deutlicher Kolmation 48
Tabelle 12: Empfohlener Wertebereich der Endversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei mäßiger Kolmation....48

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Der Niederschlagsabfluss stellt die wichtigste Berechnungsgröße in der Entwässerungsplanung dar, da er unmittelbar die Dimensionen entwässerungstechnischer Anlagen bestimmt und somit in hohem Maße deren Kosten beeinflusst. Die realitätsnahe Erfassung des Oberflächenabflusses ist somit bei nahezu sämtlichen entwässerungstechnischen Planungen von überragender Bedeutung. Fundamentale Voraussetzungen für eine sachlich zutreffende und finanziell ausgewogene Planung von Entwässerungssystemen oder einzelner Entwässerungsanlagen sind dabei zuverlässige Berechnungsgrundlagen sowie zutreffende Berechnungsmethoden. Diese sind jedoch im Hinblick auf die Quantifizierung des Oberflächenabflusses sowie der Versickerungsleistung wasserdurchlässiger Siedlungsflächen derzeit nicht in ausreichendem Maße gegeben, was zu enormen Ungenauigkeiten und Unsicherheiten führen kann.

Zur sachgerechten Berechnung und Bewertung des Abflussbeitrages von wasserdurchlässigen Flächenbelägen sind in erster Linie nach Flächentyp, Flächenbeschaffenheit und Niederschlagsbelastung differenzierte Abflussbeiwerte sowie verbesserte mathematische Berechnungsmethoden einschließlich Empfehlungen zu flächenspezifischen Parameterwerten von Nöten. Diese können aber nur auf der Basis fundierter Kenntnisse zum Abfluss- und Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger Flächenbeläge abgeleitet und formuliert werden.

Die Ziele des vorliegenden Forschungsprojektes lassen sich wie folgt benennen:

- Gewinn vertiefter Kenntnisse zum Abfluss- und Versickerungsverhalten wasserdurchlässiger Flächenbeläge
- Ableitung gesicherter Abflussbeiwerte und Versickerungskennwerte für unterschiedliche Flächentypen sowie verschiedene Randbedingungen
- (Weiter-)Entwicklung von Modellansätzen zur urbanen Niederschlagsabflusssimulation und Ausweisung flächenspezifischer Parameterwerte.

Die primäre Zielsetzung des Forschungsprojektes besteht darin, das Abfluss- und Versickerungsverhalten wasserdurchlässiger Flächenbeläge auf seine Phänomenologie hin zu untersuchen. Der prinzipielle Infiltrationsvorgang sollte hierbei analysiert und beschrieben, Einflussfaktoren identifiziert und ihre Auswirkungen auf den Versickerungsprozess quantifiziert werden.

1.2 Vorgehensweise

In einem ersten Schritt wurden die Ergebnisse in der Fachliteratur dokumentierter Untersuchungen und Erkenntnisse zusammengetragen, aufbereitet und ausgewertet. Auf dieser Grundlage sollte der Kenntnisstand zum Abflussbildungsprozess auf wasserdurchlässigen Flächenbelägen durch systematische messtechnische Untersuchungen substanziell verbessert werden. Aus diesem Grunde wurde ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt, das sowohl in-situ-Messungen an Bestandsflächen nach mehrjähriger Nutzung als auch zahlreiche Versuchsserien unter klar definierten Randbedingungen im Labor umfasst.

Besonderes Augenmerk wurde hierbei darauf gelegt, repräsentative und aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Dies umfasst sowohl die Betrachtung eines breiten Spektrums an Flächentypen als auch die Analyse der wesentlichen Einflussgrößen wie beispielsweise Oberflächengefälle, Kolmationsgrad, Niederschlagsbelastung und Flächenkonstruktion. Die Untersuchung erstreckte sich daher prinzipiell auf die gesamte Bandbreite wasserdurchlässiger Siedlungsflächen. Der Fokus lag allerdings weniger auf stark wasserdurchlässigen Flächenbelägen, da diese für die Stadthydrologie von geringerer Relevanz sind, als vielmehr auf gering bis mäßig durchlässigen Pflasterbelägen mit Fugenanteilen zwischen 1% und 15%, die bei mittleren und starken Regenereignissen einen nennenswerten Abflussbeitrag liefern können.

Auf der Basis der Ergebnisse der Laborversuche, jedoch stets mit Blick auf die Kennwerte der Literatur, erfolgte schließlich die Ableitung von Abflussbeiwerten zur Bemessung sowie die Konzeption eines verbesserten Modellansatzes zur mathematischen Beschreibung des Abfluss- und Versickerungsverhaltens wasserdurchlässiger Flächenbeläge.

Die Bemessungskennwerte – in erster Linie anwendungsspezifische Abflussbeiwerte – sollen die bisherige unzureichende Differenzierung aufweiten und dabei sowohl das Spektrum gängiger Flächentypen besser abdecken als auch maßgebende Flächenbeschaffenheiten und den Bezug zur jeweiligen Niederschlagsbelastung berücksichtigen. Der zu entwickelnde mathematische Berechnungsansatz sollte einerseits in der Lage sein, die maßgebenden physikalischen Prozesse mit einer höheren Genauigkeit als die bislang verfügbaren Berechnungsmethoden abzubilden. Andererseits soll er aber mit möglichst leicht bestimmbaren Berechnungsparametern arbeiten, mit möglichst geringem Rechenaufwand verbunden und problemlos in die gängigen urbanhydrologischen Softwarepakete implementierbar sein, um eine praktikable Anwendung zu ermöglichen.

2 Grundlagen und Kenntnisstand

2.1 Flächenbefestigungen in Siedlungsgebieten

Eine Übersicht gängiger Arten versickerungsfähig ausgebildeter Flächenbefestigungen ist in nachstehender Tabelle 1 zusammengestellt. Die Abflusswirksamkeit ist hier nur zu Orientierung angegeben und kann erheblich schwanken.

Tabelle 1: Gängige Arten wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen

Flächentyp	Abflusswirksamkeit
Plattenbelag aus Beton- oder Natursteinplatten	hoch
Pflasterbelag aus Beton- oder Natursteinen	mittel bis hoch
wassergebundene Decke	mittel bis hoch
Sickerfugenpflaster mit Kammern, Schlitzen oder ähnlichen Sickeröffnungen[1]	mittel bis gering
Rasenfugenpflaster	mittel bis gering
Rasengitterplatten	gering
Pflasterbelag aus haufwerkporigen Betonsteinen	gering
Kiesbelag	gering
Schotterrasen	gering
poröser Kunststoff (flächig vergossen)	gering
Dränasphalt	gering
Dränbeton (flächig vergossen)	gering

Als wasserdurchlässig bezeichnet man grundsätzlich all jene Flächenbefestigungen, bei denen ein mehr oder minder großer Anteil des Niederschlages durch den Flächenbelag hindurch sickern kann. Eine Versickerung des Niederschlagswassers

[1] Der Begriff Sickerfugenpflaster hat sich zwar eingebürgert, ist jedoch nicht ganz eindeutig, da abgesehen von porösen Belägen bei sämtlichen versickerungsfähig ausgebildeten Flächenbefestigung die Versickerung i.W. über die Fugen erfolgt. Der Übergang von herkömmlichen Pflasterbelägen zu Pflasterbauweisen mit speziell ausgebildeten Öffnungen ist fließend.

kann hierbei durch eine vollflächig poröse und versickerungsaktive Deckschicht oder aber durch wasserdurchlässige Sickeröffnungen in der Deckschicht erfolgen. Obwohl in beiden Fällen der Deckbelag insgesamt eine Porosität aufweist, spricht man i.d.R. nur bei Flächenbefestigungen, bei denen die vollständige Oberfläche versickerungsfähig ausgebildet ist, von porösen Flächenbefestigungen.

Bezogen auf die überbauten Flächen machen in Deutschland Pflasterbauweisen den weitaus größten Anteil an wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen aus. Pflasterungen aus Beton, erstmals Ende des 19. Jahrhunderts eingesetzt, dominieren heute und besitzen seit Jahrzehnten die weitaus größte Marktbedeutung aller bekannten Produkte zur Herstellung von Pflasterdecken. Das hauptsächliche Einsatzgebiet von Pflasterbauweisen aus Naturstein, Klinker und Beton sind Außenbereichsflächen im kommunalen, industriellen und privaten Gebäudeumfeld.[2] Pflasterbauweisen einschließlich Plattenbelägen haben dort einen Flächenanteil von rd. 70%, wovon rd. 90% unter Verwendung von Betonprodukten ausgeführt werden[3].

2.2 Kenntnisstand zum Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger Pflasterbauweisen

Die zunehmende Bedeutung wasserdurchlässiger Flächenbeläge in der Siedlungsplanung war in den letzten 15-20 Jahren Anlass für einzelne, jedoch isoliert vollzogene messtechnische Untersuchungen zum Abfluss- und Versickerungsverhalten dieser Befestigungssysteme. An dieser Stelle genannt seien u.a. die Untersuchungen der Berliner Wasserwerke (1984), von Dellwig (1988), Borgwardt (1994, 1995), Binnewies und Schütz (1985), Kretzer und Ruid-Rodrigez (1992), Schramm (1996), Hanses et al. (1999), Dierkes (1999), Zimmer (1999), Kolb (2000), Timmermann (1998, 2000), Nolting et al. (2005), Flöter (2006) und Fach (2006). Die für das vorliegende Forschungsprojekt bedeutsamsten Untersuchungen und die gewonnenen Erkenntnisse werden nachfolgend nur knapp zusammengefasst. Auf eine ausführliche Erörterung wird an dieser Stelle verzichtet und auf den ausführlichen Abschlussbericht verwiesen.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass für die Mehrzahl der in Deutschland gängigen Flächenbefestigungen (vgl. Tabelle 1) Kennwerte zum Versickerungsvermögen im Gebrauchszustand vorliegen – wenn auch in recht begrenztem Umfang.

---

2 Ulonska, D. (2005); S. 4

3 SLG (2004)

In Tabelle 2 ist die Bandbreite der in den verschiedenen o.g. Untersuchungen festgestellten Versickerungsraten zusammengestellt. Die angegebenen Zahlenwerte dokumentieren den enormen Wertebereich, in dem das Infiltrationsvermögen variieren kann, und können daher nur als Orientierungsgrößen verstanden werden. In Einzelfällen können sicherlich von den angegebenen Zahlenwerten abweichende Versickerungsraten angetroffen werden. Dennoch stellen sie eine wichtige Vergleichsbasis für die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes dar.

Tabelle 2: Bandbreite des in der Fachliteratur angegebenen Versickerungsvermögens wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen im Gebrauchszustand

Flächenbefestigung	Fugenanteil	Versickerungs-vermögen
Plattenbelag aus Beton- oder Natursteinplatten	≤ 5%	5 - 80 l/(s·ha)
Pflasterbelag aus Beton- oder Natursteinen	5% - 10%	20 - 220 l/(s·ha)
Klein- und Mosaikpflaster	15% - 35%	5 - 350 l/(s·ha)
Rasenfugenpflaster	10% - 35%	50 - 800 l/(s·ha)
Rasengitterplatten	≥ 25%	50 - 1.600 l/(s·ha)
Sickerfugenpflaster mit Kammern, Schlitzen oder ähnlichen Sickeröffnungen	10% - 35%	50 – 3.100 l/(s·ha)
Pflasterbelag aus haufwerkporigen Betonsteinen	—	90 - 3.200 l/(s·ha)
Dränasphalt	—	100 - 400 l/(s·ha)
Dränbeton (flächig vergossen)	—	300 - 10.000 l/(s·ha)
Schotterrasen	—	100 - 1.000 l/(s·ha)
wassergebundene Decke	—	0 - 100 l/(s·ha)

3 Material und Methoden

Im Rahmen des hier dokumentierten Forschungsprojektes sollten detaillierte Erkenntnisse zum physikalischen Phänomen der Abflussbildung auf versickerungsfähig ausgebildeten Flächenbelägen gewonnen werden. Hierzu wurde in einem ersten Bearbeitungsschritt der bisherige Kenntnisstand zusammengetragen. Den Kern des Forschungsvorhabens bildet jedoch ein eigenes Messprogramm, bei dem das Abfluss- und Versickerungsverhalten durch Feldmessungen an Bestandsflächen sowie durch Lysimeterversuche im Labor systematisch untersucht wird. Der Fokus liegt dabei vorwiegend auf gering bis mäßig durchlässigen Pflasterbelägen, da diese bislang weniger Beachtung fanden, hinsichtlich des Abflussbeitrages zur Kanalisation jedoch von höherer Relevanz sind als versickerungsstarke Ökopflasterbeläge.

3.1 Untersuchungsmethodik der Feldmessungen an Bestandsflächen

Im Rahmen der Untersuchung wurden 21 Infiltrometertests auf sechs unterschiedlichen Pflastersystemen mit Hilfe eines Tropfinfiltrometers durchgeführt. Hierbei wurde jeder Belag an mehreren Stellen in der Örtlichkeit beprobt. Eine Übersicht der untersuchten Pflasterbeläge sowie die wesentlichen Flächencharakteristika sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Primäre Zielsetzung der Feldmessungen an Bestandsflächen war es, Kenntnisse über das Versickerungsvermögen im Gebrauchszustand zu gewinnen, also nach mehrjähriger Nutzungsdauer und entsprechendem Rückgang der Versickerungsleistung bspw. durch den Eintrag von Feinpartikeln in die Fugen (Kolmation) oder sukzessive Nachverdichtung des Oberbaus. Zusammen mit den in der Fachliteratur dokumentierten Kennwerten dienten die Messergebnisse ferner als wichtige Referenzwerte, um verschiedene Kolmationsgrade nachfolgend auch im Rahmen der Laborversuche adäquat nachbilden zu können.

Tabelle 3: Übersicht der Untersuchungsflächen der Infiltrometermessungen[4]

Ort	Belagstyp	Fugen-weite	Fugen-material	Nutzung	Messpunkte	Fabrikat
Lingen	gefügedichtes Betonpflaster	3-4 mm (4,5%)	Sand 0/1 mm	Parkplatz	Stellplatzmitte (2) + Fahrspur (2)	Behaton (Rechteck)
Lingen	gefügedichtes Betonpflaster	10 mm (14%)	Splitt 2/5 mm	Parkplatz	Stellplatzmitte + Fahrspur	Behaton (Rechteck)
Lingen	Porenbetonpflaster	3-4 mm (4,5%)	Sand 0/2 mm	Parkplatz	Stellplatzmitte + Fahrspur	Rekers (Reko-Drain)
Lingen	Sickerfugenpflaster (spez. Sickerrillen)	4 mm (6%)	Sand 0/2 mm	Parkplatz	Stellplatzmitte + Fahrspur	Klostermann (DrainSTON)
Gelsen-kirchen	Verbundstein mit Sickeröffnungen	3-4 mm (8%)	Splitt 2/5 mm	Parkplatz	Stellplatzmitte + Fahrspur (2)	Behaton (DV Öko)
Straelen	Porenbetonpflaster	3-4 mm (4,5%)	feiner Splitt	Schulhof	Einfahrt + Schul-hof (2) + ver-mooster Bereich	Klostermann (geoSTON)
Kevelaer	Porenbetonpflaster	4 mm (5%)	n.b. vermtl. feiner Splitt	Parkplatz	Fahrspur + verschm. Bereich + Busstellplatz	Klostermann (geoSTON SL)
		25 mm (rd. 35%)	n.b. (begrünt)	Parkplatz	Busstellplatz	Klostermann (geoSTON SL)

Fugenweite: Werte in Klammern geben den Fugenanteil einschließlich Sickerkammern an.
Messpunkte: Werte in Klammern geben die Anzahl der Versuche an.

Bei allen betrachteten Untersuchungsflächen handelt es sich um regelkonform errichtete Pflasterbeläge mit Betonsteinen namhafter und umsatzstarker Hersteller. Die Mehrzahl der Flächen wird als Parkplatz oder Zufahrtsweg genutzt; ein Pflasterbelag stellt die Flächenbefestigung eines Schulhofes dar. Die Liegezeiten der Untersuchungsflächen betrugen zum Zeitpunkt der Messungen zwischen vier und zehn Jahren. Einige der untersuchten Flächen liegen auf dem Parkplatz in Lingen, auf dem Timmermann[5] bereits umfangreiche Langzeituntersuchungen durchgeführt hat.

Die Messpunkte an den untersuchten Standorten wurden so gewählt, das Flächenbereiche mit höherer und niedriger mechanischer Belastung durch Autoverkehr, mit stärkerem und schwächerem Feinpartikeleintrag sowie mit stärkerer und schwächerer Vermoosung bzw. Verkrautung erfasst werden.

4 Orte: Lingen/Ems (Niedersachsen); Gelsenkirchen, Straelen und Kevelaer (NRW)

5 Timmermann, U. (1998), (2000) und (2001)

3.2 Untersuchungsmethodik der Laborversuche

Den Schwerpunkt des messtechnischen Untersuchungsprogramms bilden umfangreiche Beregnungsversuche an einer Lysimeteranlage am IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur (IKT).[6] In rd. 140 Beregnungsversuchen wurden zahlreiche Belagstypen für verschiedene Beregnungslastfälle jeweils unter variierenden Randbedingungen untersucht. Gemessen wurden jeweils der Oberflächenabfluss, der Sickerabfluss aus der Tragschicht sowie die volumetrischen Wassergehalte in verschiedenen Horizonten der Tragschicht.

Der Vorteil der Laborversuche besteht darin, einzelne Einflussfaktoren wie Niederschlagsbelastung, Gefälle, Kolmationsgrad, Aufbau, Materialeigenschaften, Untergrundverhältnisse usw. systematisch untersuchen und analysieren zu können. Die Variation jeweils nur einer dieser Randbedingungen im Versuchszyklus erlaubt eine eindeutige Zuordnung und Bewertung. So kann bspw. der Einfluss des Oberflächengefälles an Beregnungsversuchen eines bestimmten Belages bei verschiedenen Gefällestufen unter sonst gleichen Randbedingungen bestimmt werden. Darüber hinaus können die versickerungsrelevanten Eigenschaften der einzelnen Schichten – Pflasterbelag und Bettung, Tragschicht sowie Planum/Untergrund – unabhängig voneinander untersucht und ihre Wechselwirkungen bewertet werden.

Die Lysimeteranlage am IKT, mit der sämtliche Beregnungsversuche im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführt wurden, ist eigens für die Prüfung wasserdurchlässiger Flächenbeläge konstruiert und zur Anwendung im vorliegenden Forschungsvorhaben gezielt erweitert worden. Ursprünglich diente die Anlage in erster Linie der Durchführung von Eignungs- und Zulassungsprüfungen von wasserdurchlässigen Flächensystemen nach einem jüngst entwickelten Prüfverfahren des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt). Eine schematische Darstellung der Versuchsanlage zeigt Abbildung 1.

Da es nicht möglich ist, Pflasterbeläge nach mehrjähriger Standzeit in situ auszubauen und anschließend im Versuchsstand zu untersuchen, ohne das Pflastergefüge samt Fugenfüllung zu beschädigen, wurde der Eintrag von Feinpartikeln in das Fugenmaterial, wie er sich bei Flächen in situ über die Jahre zweifelsfrei vollzieht, im Labor durch Auftragen und Einspülen von Quarzmehl (Mikrosil Typ 5) nachgebildet.

Das Einspülen von Quarzmehl in den Fugenraum ist nach derzeitigem Kenntnisstand die geeignetste Methode zur Simulation des Feinpartikeleintrages, da es von seiner Körnungsstruktur dem Feinmaterial, das man in den Fugen von Ober-

[6] Bosseler et al. (2004) und IKT (2005)

flächenbefestigungen findet, sehr ähnelt.[7] Dabei wird das Quarzmehl breitflächig auf die Oberfläche des Pflasterbelages aufgestreut und in ein oder mehreren Beregnungsintervallen in den Fugenraum gespült.

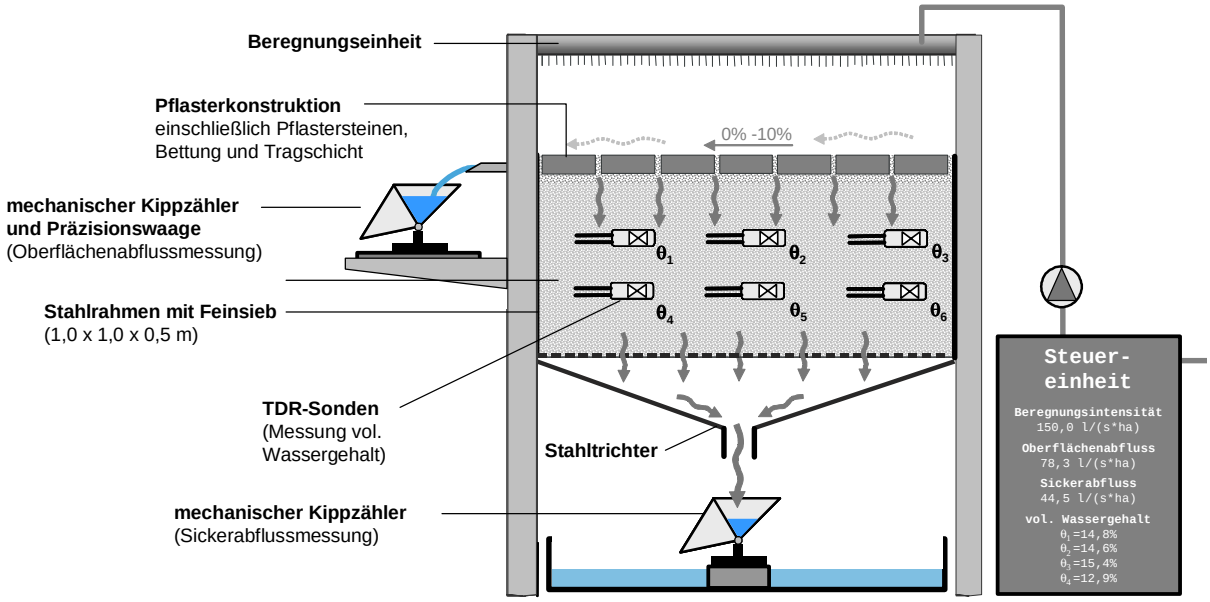


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Lysimeteranlage

Die Zuordnung der verwendeten Quarzmehlmengen zu verschiedenen Kolmationsgraden erfolgt durch einen Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen der vorab durchgeführten Infiltrometermessungen an den z.T. baugleichen Flächenbelägen sowie den in der Literatur angegebenen Wertebereichen. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden darüber hinaus auch an den im Labor untersuchten und mit Quarzmehl beaufschlagten Testflächen Infiltrationsversuche analog den Versuchen in situ durchgeführt. Diese Vorgehensweise hat sich prinzipiell bewährt und hat es ermöglicht, den Vorteil von Laboruntersuchungen mit klar definierten und reproduzierbaren Versuchsbedingungen mit dem Abfluss- und Versickerungsverhalten von Flächenbefestigungen unter realen Nutzungsbedingungen und nach mehrjähriger Standzeit zu verknüpfen.

Die Laborversuche umfassen insgesamt sieben Versuchsserien. Dabei wurden verschiedene Pflasterbeläge mit unterschiedlichem Gefälle, unterschiedlichen Kolmationsgraden sowie unterschiedlichem Aufbau mit verschiedenen Intensitäten beregnet. Um die Analyse der Messwerte zu erleichtern, wurden vorwiegend konstante Beregnungsintensitäten gefahren. Eine Kurzübersicht der durchgeführten Versuchsserien ist in Tabelle 4 zusammengestellt.

[7] Davies, J.W. et al. (2002)

Tabelle 4: Übersicht der Versuchsserien am Lysimeter

Serie	Belagstyp	Fugen-weite	Gefälle	Quarzmehl-menge	Beregnungs-intensitäten	Pflaster-stein
1 (11)	**Sickerfugenpflaster** splittverfüllte Fugen	10 mm (14%)	2,5%	0 - 2000 g/m² (4)	200-800 l/(s·ha)	Rechteckstein (behaton)
2 (30)	**fugenarmes Beton-pflaster**	3-4 mm (4,5%)	2,5%	0 - 750 g/m² (3)	50-500 l/(s·ha)	Rechteckstein (behaton)
3 (45)	**fugenarmes Beton-pflaster**	3-4 mm (4,5%)	2,5-7,5% (3)	0 - 500 g/m² (4)	100-300 l/(s·ha)	Doppelver-bundstein
4 (16)	**Sickerfugenpflaster** splittverfüllte Fugen	10 mm (14%)		0 - 8600 g/m² (8)	100-300 l/(s·ha)	Rechteckstein (behaton)
5 (31)	**fugenarmes Beton-pflaster**	3-4 mm (4,5%)	2,5%	0 - 400 g/m² (3)	25-1000 l/(s·ha)	Doppelver-bundstein
	Schottertragschicht (ohne Deckbelag)	—	—	—	100-500 l/(s·ha)	—
	Sickerfugenpflaster splittverfüllte Fugen	10 mm (14%)	2,5%	0 - 2000 g/m² (3)	200-1000 l/(s·ha)	Rechteckstein (behaton)
	Betonpflaster leicht aufgew. Fugen	7 mm (10%)	2,5%	0 - 1000 g/m² (3)	200-1000 l/(s·ha)	Rechteckstein (behaton)
	Porenbetonpflaster	3-4 mm (4,5%)	2,5%	0 - 2000 g/m² (4)	200-1000 l/(s·ha)	RE-Porenstein (behaton)
	fugenarmes Beton-pflaster	3-4 mm (4,5%)	2,5%	0 - 400 g/m² (2)	25-1000 l/(s·ha)	Doppelver-bundstein
	fugenarmes Beton-pflaster	3-4 mm (4,5%)	2,5%	0 - 400 g/m² (2)	25-1000 l/(s·ha)	Rechteckstein
6 (5)	**Porenbetonpflaster**	3-4 mm (4,5%)	7,5%	nur Neuzustand	200-1000 l/(s·ha	Quadratstein (geoSTON)
7 (7)	**Plattenbelag**	3-4 mm (0,6%)	2,5%	0 - 500 g/m² (2)	100-300 l/(s·ha	Platten 50x50 cm
	Plattenbelag	3-4 mm (1,2%)	2,5%	0 - 500 g/m² (2)	100-300 l/(s·ha	Platten 40x40 cm
	Plattenbelag	3-4 mm (1,8%)	2,5%	0 - 500 g/m² (2)	100-300 l/(s·ha	Platten 30x30 cm
	Plattenbelag gering durchl. Planum	3-4 mm (1,8%)	2,5%	500 g/m²	100-500 l/(s·ha	Platten 30x30 cm

Serie: Werte in Klammern geben die Anzahl der Versuche innerhalb der Serie an. Dabei wurden je Versuch z.T. mehrere Beregnungs-intensitäten mit entsprechenden Trockenintervallen gefahren.
Fugenweite: Werte in Klammern geben den Fugenanteil an.
Quarzmehlmenge: Werte in Klammern geben die Anzahl der untersuchten Quarzmehlmengen bzw. Kolmationsgrade an.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Infiltrationsversuche an Bestandsflächen

Auf einem bereits von der Fachhochschule Osnabrück[8] intensiv untersuchten Parkplatz in Lingen, der 1994 im Rahmen eines Forschungsprojektes als Versuchsanlage errichtet worden ist, wurde das Versickerungsvermögen von vier unterschiedlichen Pflasterbauweisen mit Hilfe eines Tropfinfiltrometers beprobt. Das Oberflächengefälle der Testflächen beträgt jeweils 2,5%.

Abbildung 2: Untersuchungsflächen am Standort Lingen

Vier Infiltrometermessungen wurden auf einem Stellplatz des Parkplatzes aus fugenarm verlegten Rechtecksteinen[9] durchgeführt; davon zwei Messungen jeweils im Zentrum des Stellplatzes und zwei Messungen in Bereichen, in denen verstärkte mechanische Belastungen durch ein- und ausparkende Fahrzeuge auftreten (Radspur des Stellplatzes[10]). Die in Abbildung 3 dargestellten Infiltrationsganglinien der Messpunkte zeigen den erwarteten Verlauf mit hohen aber relativ rasch sinkenden Infiltrationsraten zu Beginn der Versuche, wenn sich die Porenräume des grobkörnigen Sandes der Fugen sowie der Bettungsschicht mit Wasser füllen, sowie mit sukzessive abnehmenden Versickerungsraten im nachfolgenden Verlauf. Dabei verlaufen die Versickerungsraten der Bereiche mit geringerer mechanischer Belastung auf z.T. deutlich höherem Niveau als die in der Radspur des Stellplatzes gemessenen Versickerungsraten. Lediglich bei einem Messpunkt in Stellplatzmitte wurde ein nahezu identischer Infiltrationsverlauf aufgezeichnet wie in der Fahrspur. Bei dieser Messung reagierte der kapazi-

8 Timmermann, U. (1998), (2000) und (2001)

9 Hersteller: behaton; Fugenbreite: 3-4 mm; Fugenfüllung: Sand 0/1 mm

10 Lage: rd. 50 cm von der seitlichen Begrenzung nach innen

tive Abstandssensor des Tropfinfiltrometers jedoch auch nicht ganz einwandfrei, so dass die Fläche zeitweilig mit weniger Wasser beregnet wurde.

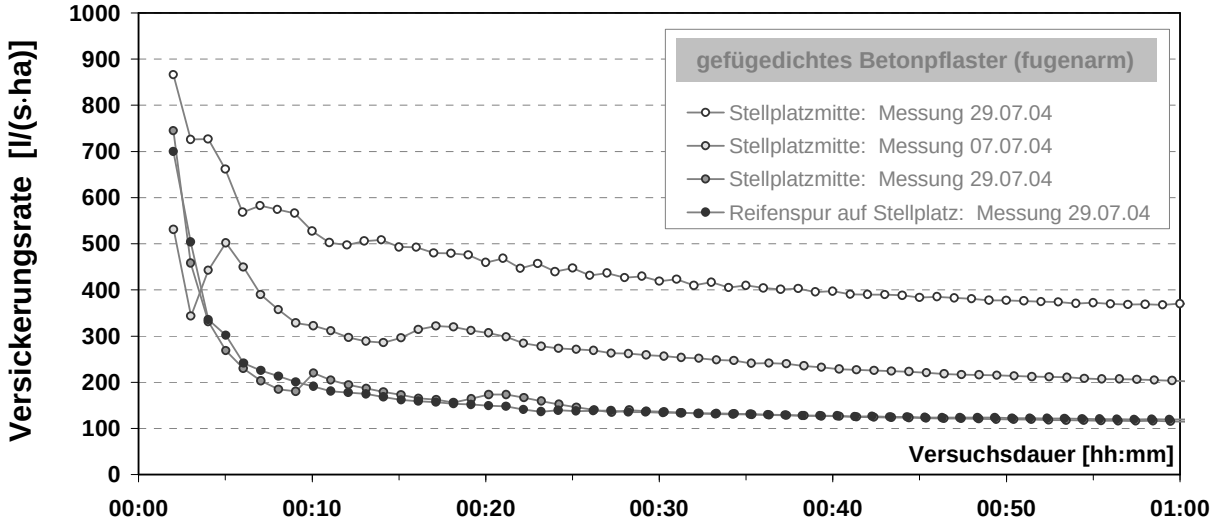


Abbildung 3: **Infiltrationsganglinien aus den Messungen an fugenarmem Standardpflaster aus gefügedichten Betonsteinen**

Die dargestellten Infiltrationsverläufe dokumentieren die hohe kleinräumige Variabilität in den Versickerungsleistungen, liegen die Messpunkte doch allesamt in einem Radius von rd. zwei Metern. Insgesamt überrascht zudem das mit Infiltrationsraten von z.T. deutlich über 100 l/(s·ha) ausgesprochen hohe Versickerungsvermögen dieses als eher gering wasserdurchlässig eingeschätzten Belages.

Für den Sickerfugenbelag waren die Differenzen nicht ganz so eklatant, allerdings war hier für die Stellplatzmitte ein degressiver Verlauf der Infiltrationsrate zu beobachten, während die Versickerungsrate im Bereich der Radspur kontinuierlich zunahm. Die Endversickerungsrate war hierbei in der minder belasteten Stellplatzmitte mit beachtlichen 300 l/(s·ha) mehr als doppelt so hoch als die Endinfiltrationsrate im Bereich der Radspur.

Aus den Ganglinienverläufen wurden charakteristische Infiltrationskennwerte extrahiert. Dabei wird die nach einer Versuchsdauer von 10 Minuten gemessene Infiltrationsrate als (versuchsspezifische) Anfangsinfiltrationsrate definiert. Als Endinfiltrationsrate wird der Messwert nach einer Versuchsdauer von rd. 60 Minuten bezeichnet. In Abbildung 4 sind die Anfangs- und Endinfiltrationsraten der vier am Standort Lingen untersuchten Pflasterbauweisen einander gegenüber gestellt. Die Grafik unterstreicht, dass selbst mäßig durchlässige Pflasterarten auch nach mehr als zehnjähriger Liegezeit ein durchaus erstaunlich hohes Versickerungsvermögen aufweisen können.

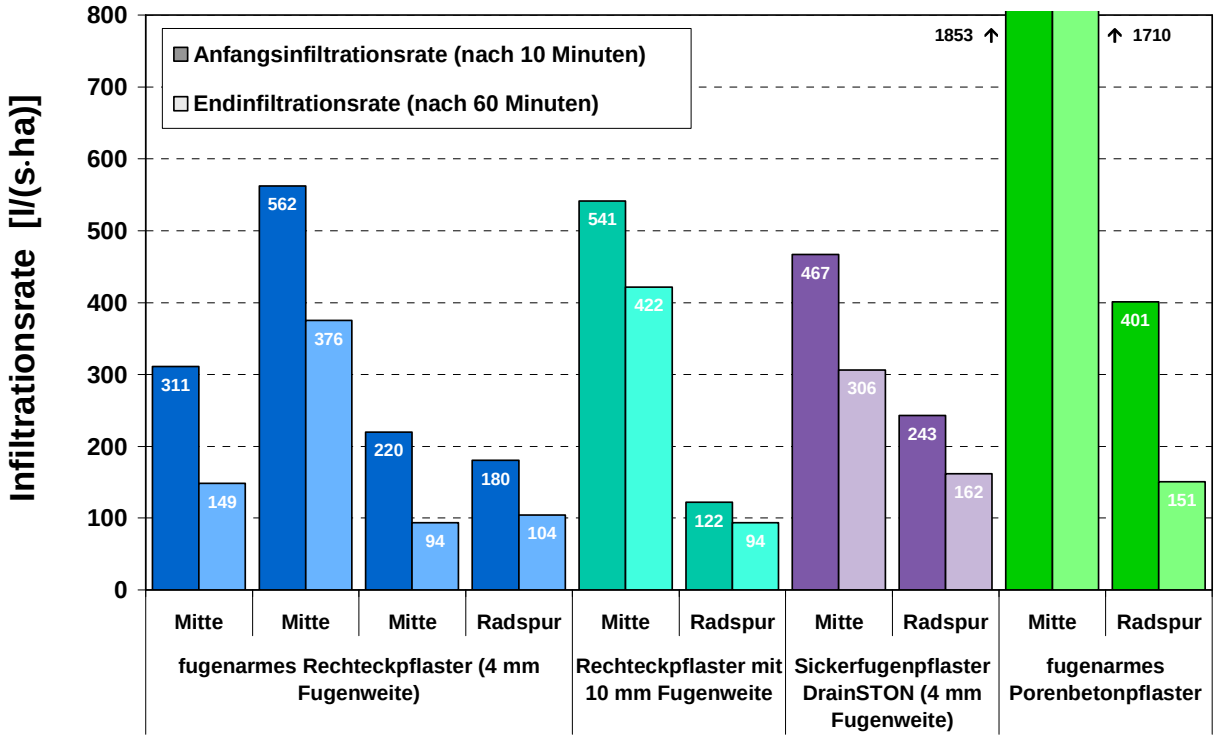


Abbildung 4: **Anfangs- und Endinfiltrationsraten der vier am Standort Lingen untersuchten Pflastertypen**

Darüber hinaus belegt die Abbildung den eindeutigen Zusammenhang zwischen der mechanischen Belastung durch fahrende oder parkende Fahrzeuge und dem Versickerungsvermögen. Auf allen Testflächen wurde – unabhängig vom Belagstyp – in Bereichen, in denen gehäuft die Achslasten von Fahrzeugen über die Pflasterung in den Untergrund abgetragen werden, reduzierte Versickerungsraten angetroffen.

Auf einem Parkplatz in Gelsenkirchen[11] wurden drei weitere Infiltrometerversuche an einem Belag aus Sickerfugenpflaster durchgeführt. Der Belag besteht aus gefügedichten, fugenarm verlegten Doppelverbundsteinen, die an den Stirnseiten Kammern bilden, die mit Splitt verfüllt wurden[12]. Die drei Messpunkte befanden sich auf drei unterschiedlichen Stellplätzen; einer davon im minder belasteten Bereich in der Stellplatzmitte. Die beiden anderen Messpunkte lagen im Bereich der Radspur des jeweiligen Stellplatzes.

Der untersuchte Sickerfugenbelag verfügt ebenfalls über ein sehr hohes Versickerungsvermögen, das an den Messpunkten auch nach 60 Minuten noch über 400 l/(s·ha) betrug (Abbildung 5). Zu Beginn der Versuche nahmen die Infiltrationsraten, bedingt durch das grobporige Fugenmaterial, besonders rasch ab, da

11 Parkplatz der Veltins Arena

12 Hersteller: behaton; Pflasterstein: DV-öko; Fugenmaterial: Splitt 2/5 mm

die Porenräume des Splitts sehr rasch gefüllt werden können. Bereits nach nur rd. fünf Minuten nahm die Versickerungsrate bei zwei der drei untersuchten Messpunkte nur noch langsam mit der fortlaufenden Versuchsdauer ab.

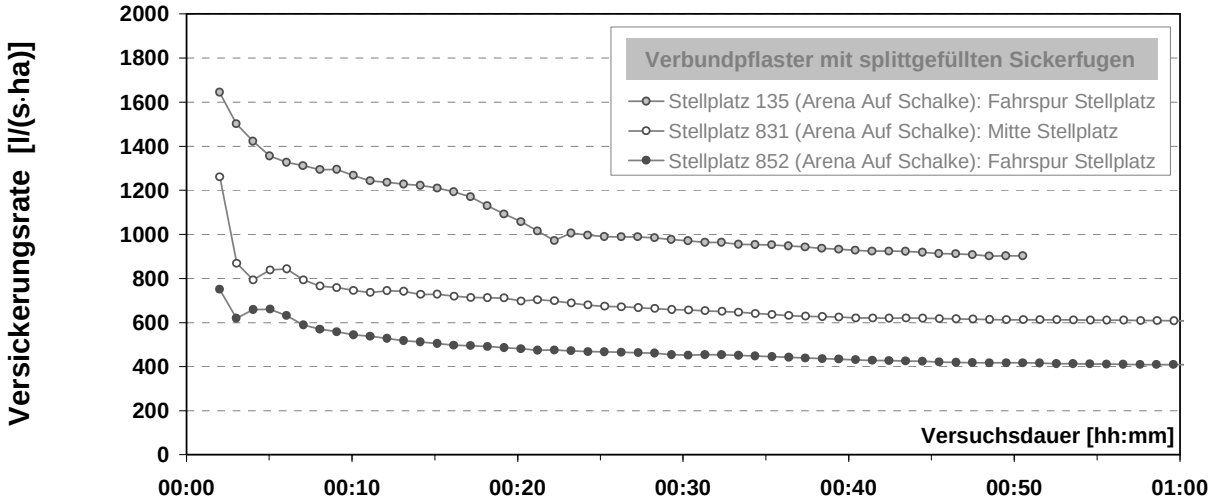


Abbildung 5: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an Sickerfugenpflaster mit splittgefüllten Sickerkammern

Abbildung 5 veranschaulicht zudem noch einmal den großen Wertebereich, in dem das Infiltrationsvermögen einer Pflasterbauweise nach mehrjähriger Nutzung – auch kleinräumig – streuen kann. So ergaben sich bei den drei Versuchen Endinfiltrationsraten von rd. 400 l/(s·ha), 600 l/(s·ha) sowie von 900 l/(s·ha).

Im Rahmen der Felduntersuchungen wurden noch an zwei weiteren Standorten Infiltrometerversuche durchgeführt. Dabei wurden Pflasterbeläge aus Porenbetonsteinen auf einem Busparkplatz des Wallfahrtsortes Kevelaer sowie auf einem Schulhof in Straelen betrachtet.[13]

Die Infiltrationsraten an den untersuchten Messpunkten waren – mit einer Ausnahme – sehr hoch und weisen durchweg Werte von z.T. deutlich über 1.000 l/(s·ha) auf. Auf dem Busparkplatz in Kevelaer wurde jedoch auch ein Bereich untersucht, auf dem großflächig eine rote Asche[14] von einem nahe gelegenen Gehweg auf die Pflasterung aus Porenbeton getragen worden ist. Hier war das Versickerungsvermögen im Vergleich zu den übrigen Messpunkten in erheblichem Maße herabgesetzt (Faktor 100) und betrug nur noch 20-63 l/(s·ha). Abbildung 6 zeigt die Gegenüberstellung der Messwerte an beiden Standorten.

---

13 Hersteller: Klostermann; Pflasterstein: geoSTON SL; an einem Messpunkt mit aufgeweiteter Fuge von 25 mm Breite; an den übrigen Messpunkten betrug die Fugenbreite 3-4 mm

14 eine exakte Spezifizierung dieses feinkörnigen, rotfarbigen Materials war nicht möglich

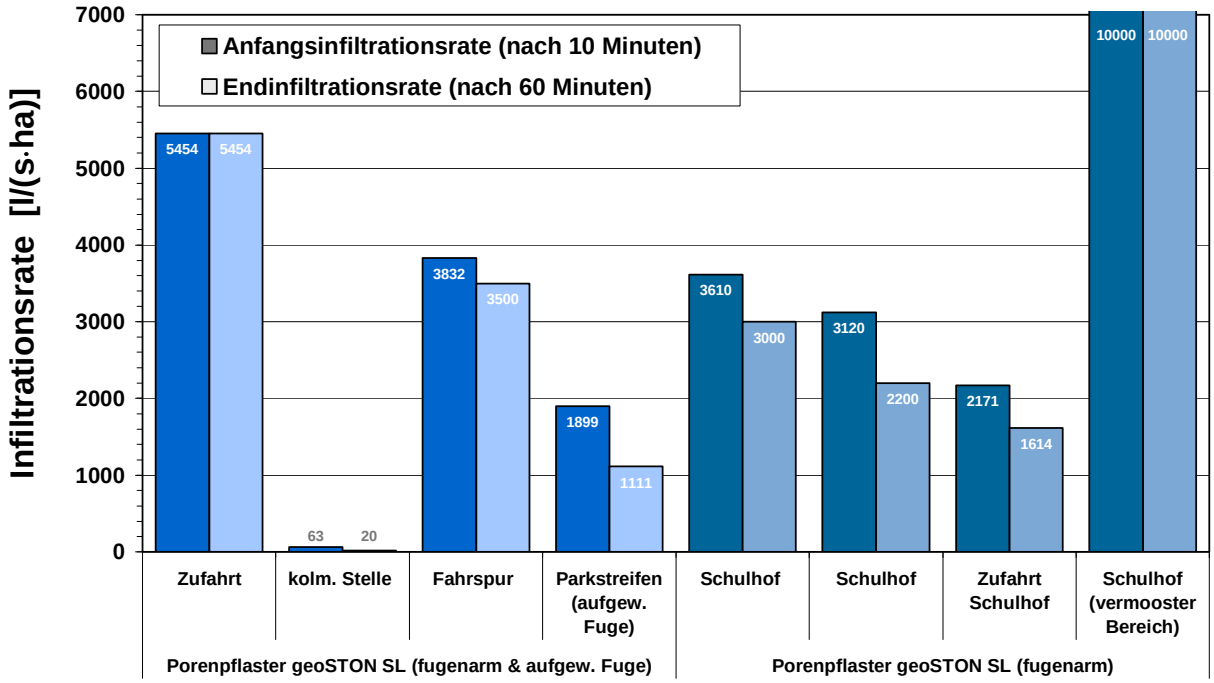


Abbildung 6: **Bandbreite der in Straelen und Kevelaer gemessenen Versickerungsraten an Pflasterbelägen aus haufwerksporigen Betonsteinen**

Auffällig sind hier v.a. die hohen Versickerungsraten, die am Standort Straelen in einem recht vermoosten Bereich des Schulhofes gemessen wurden. Eine Vermoosung oder Verkrautung der Fugen muss folglich nicht zwangsläufig mit einer Reduzierung des Versickerungsvermögens verbunden sein. Umgekehrt ist es auch möglich, dass die Wurzeln das Fugenmaterial auflockern oder bevorzugte Leitungsbahnen bei der Versickerung darstellen. Ansonsten sind die Infiltrationsraten der beiden Standorte recht heterogen, ohne dabei eine besondere Tendenz ausmachen zu können. Obwohl die Flächen in Kevelaer durch den Busverkehr einer sehr hohen mechanischen Belastung unterliegen, weisen die Flächen ebenso hohe Infiltrationsraten wie der Schulhof in Straelen auf. Dennoch unterstreicht Abbildung 6 einmal mehr die – auch kleinräumig anzutreffende – hohe Variabilität im Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger Pflasterbauweisen.

Fazit der Feldversuche

Die hohen Versickerungsleistungen der untersuchten Beläge aus Porenbeton- und Sickerfugensteinen bestätigen i.W. die Ergebnisse von Nolting et al. (2005). Die weiteren am Standort in Lingen beprobten Flächenbeläge weisen im Vergleich zu den in der Literatur überwiegend genannten Werten relativ hohe Infiltrationsraten auf.

Zweifelsohne beeinflussen sowohl die Konstruktion als auch die Nutzung einer Fläche deren Versickerungsvermögen. Eine Nachverdichtung bspw. durch Fahr-

zeugverkehr kann ebenso zu einer Reduzierung der Infiltrationsleistung führen wie ein ausgeprägter Eintrag von Feinpartikeln in die Fugen. Dabei sind feinkörnigere Fugenmaterialien empfindlicher gegenüber Kolmationserscheinungen als grobkörnigere Aggregate, bei denen sich Feinpartikel schwieriger anlagern und/oder durch den Fugenraum in die Pflasterbettung transportiert werden, wo sie geringere Auswirkungen auf das Versickerungsvermögen der Pflasterung haben.

Insbesondere bei Pflasterbauweisen, bei denen die Versickerung über die Fugen erfolgt, spielt die (dauerhafte) Durchlässigkeit des Fugenmaterials eine übergeordnete Rolle hinsichtlich der Versickerungsfähigkeit. Kolb et al. (1998 und 2000) haben jedoch gezeigt, dass auch das Fugenmaterial im Laufe der Standzeit einer Nachverdichtung (als Folge der Versickerung) unterliegt, die ebenfalls zu einer Reduzierung des hydraulischen Leitfähigkeitvermögens führt.

Die vielfältigen, das Versickerungsvermögen beeinflussenden Faktoren spiegeln sich in der hohen Variabilität der an Bestandsflächen gemessenen Infiltrationsraten wider. Das Versickerungsvermögen kann dabei auch sehr kleinräumig in erheblichem Maße schwanken. Das explizite Versickerungsvermögen einer bestimmten Pflasterfläche nach mehrjähriger Nutzung ist daher nicht vorhersagbar.

4.2 Beregnungsversuche im Labor

Anhand von Beregnungsversuchen an der in Kapitel 3.2 beschriebenen Lysimeteranlage wurde das Abfluss- und Versickerungsverhalten verschiedener wasserdurchlässig ausgebildeter Pflasterbauweisen systematisch auf seine Phänomenologie hin untersucht. Dabei wurden insbesondere die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Versickerungsrate wie die Niederschlagsbelastung sowie das Oberflächengefälle und der Kolmationsgrad der Fläche analysiert. Die Untersuchungen umfassten verschiedene Pflaster- und Plattenbeläge mit ganz unterschiedlichem Versickerungsvermögen. Die wesentlichsten Ergebnisse der Labormessreihe werden nachfolgend kurz zusammengefasst.

4.2.1 Fugenarm verlegte Pflasterbeläge aus gefügedichten Betonsteinen

Im Rahmen des Messprogramms im Labor wurden herkömmliche Pflasterbeläge aus fugenarm verlegten, gefügedichten Betonsteinen am intensivsten untersucht. Dabei wurden Messreihen an Belägen aus Doppelverbundpflaster sowie aus Rechtecksteinen vollzogen (siehe Abbildung 7).

Abbildung 7: Flächenbeläge aus fugenarmem Doppelverbund- und Rechteckpflaster

Abbildung 8 zeigt die bei verschiedenen Beregnungsintensitäten resultierenden Versickerungsraten bei einem gering bis mäßig kolmatierten sowie einem deutlich kolmatierten Belag (Einspülung von 200 g/m² bzw. 400 g/m² Quarzmehl in das Fugenmaterial); jeweils bei einem Oberflächengefälle von 2,5%.

Für beide Kolmationsgrade wurde ein signifikanter Einfluss der Beregnungsintensität auf das Infiltrationsvermögen beobachtet. Die Infiltrationsrate nahm hierbei bei höheren Beregnungsintensitäten z.T. deutlich höhere Werte an als bei geringeren Intensitäten, zeigt dabei aber für alle Beregnungsintensitäten einen relativ konstanten Verlauf. Lediglich in den ersten Minuten können höhere, z.T. aber auch niedrigere Werte auftreten. Im weiteren Verlauf der dargestellten Versuche änderte sich die Infiltrationsrate bei anhaltender Beregnungsintensität lediglich in einem Wertebereich von maximal ± 15 l/(s·ha). Die in Abbildung 8 gegenüber gestellten Infiltrationsverläufe dokumentieren darüber hinaus, in welchem Maße sich ein Feinpartikeleintrag in die Fugen auf das Versickerungsvermögen des Pflasterbelages auswirkt.

Der Einfluss des Oberflächengefälles auf das Versickerungsvermögen eines Doppelverbundpflasters wird in Abbildung 9 veranschaulicht. Die Grafik zeigt die gemessenen Versickerungsraten in Abhängigkeit von Beregnungsintensität, Kolmationsgrad und Gefälle am Beispiel einer Beregnungsdauer von 15 Minuten. Aufgrund der über die Versuchsdauer relativ konstanten Versickerungsraten ergibt sich für andere Dauerstufen ein ganz ähnliches Bild.

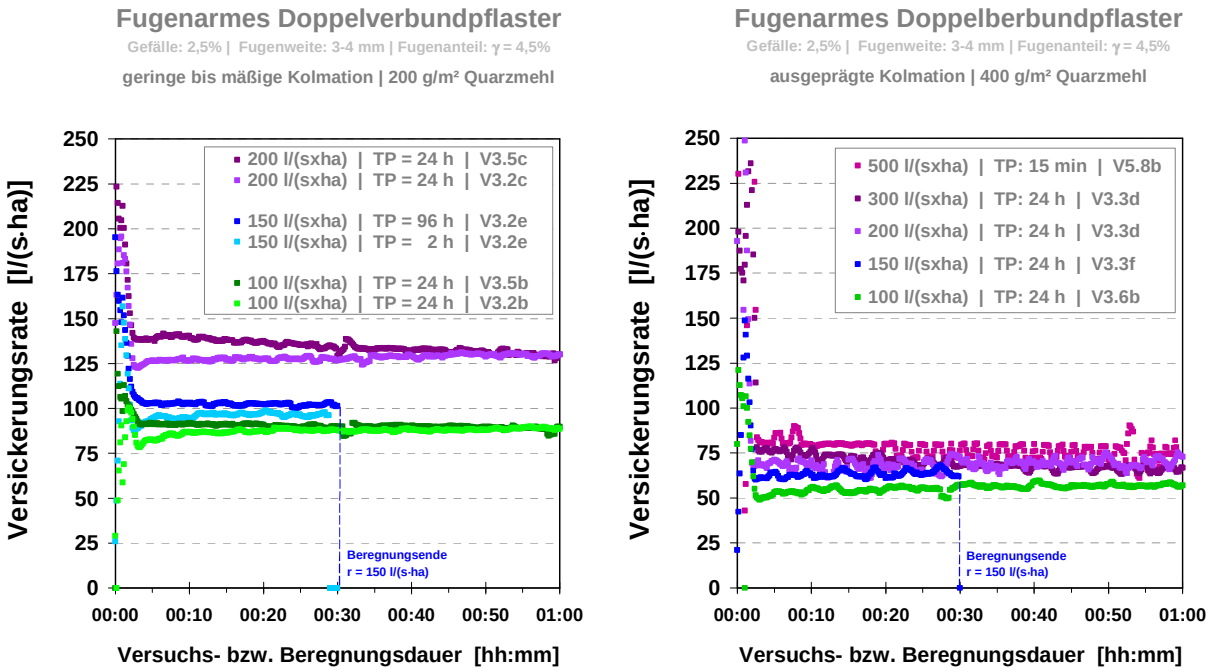


Abbildung 8: **Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei mäßigem sowie bei ausgeprägtem Kolmationsgrad in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität (2,5% Gefälle)[15]**

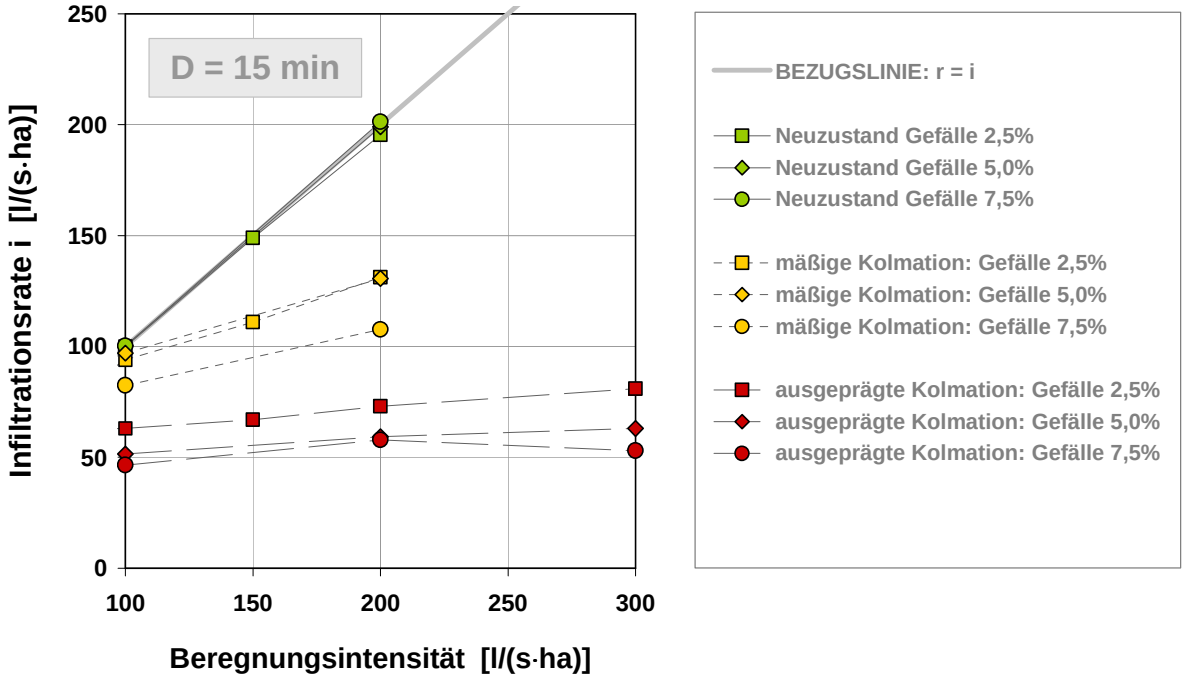


Abbildung 9: **Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters in Abhängigkeit von Beregnungsintensität, Kolmationsgrad und Gefälle (D = 15 min)**

[15] TP: Dauer der Trockenperiode vor Beregnungsbeginn

Die Abhängigkeit des Versickerungsvermögens von der Niederschlagsbelastung wurde bislang in der Fachliteratur kaum erwähnt, geschweige denn im Detail anhand von Messdaten diskutiert. Dabei scheint es jedoch angesichts der im Rahmen dieses Forschungsprojektes gewonnen Erkenntnisse so zu sein, dass bei Vorliegen eines höheren Wasserangebotes auf der Oberfläche ein Pflasterbelag mehr Wasser in den Oberbau infiltrieren kann als dies bei einer geringeren Wasserzufuhr möglich ist. Dies zeigt sich besonders an einem Beregnungsversuch mit variabler Beregnungsintensität, der für den Belag aus fugenarmem Doppelverbundpflaster bei einer aufgetragenen Quarzmehlmenge von 400 g/m² durchgeführt worden ist (siehe ungekürzten Abschlussbericht).

Die Versuchsergebnisse bekräftigen und belegen die o.g. These, dass zwischen dem momentanen Versickerungsvermögen einer Pflasterfläche und der aktuellen Niederschlagsintensität ein signifikanter Zusammenhang besteht. Die Infiltrationsrate steigt dabei mit zunehmender Beregnungsintensität in durchaus nennenswertem Maße an.

Für den Pflasterbelag aus Doppelverbundsteinen wurde darüber hinaus analysiert, inwiefern sich unterschiedlich lange Trockenperioden vor einem Regenereignis bzw. einer Beregnung auf das Versickerungsvermögen auswirken. Im Rahmen der Laborversuche wurden für den Pflasteraufbau mit 2,5% Gefälle für alle betrachteten Kolmationsgrade hierzu Versuche mit intermittierender Beregnung durchgeführt. Dabei wurden je Versuchszyklus drei bis vier Beregnungsintervalle mit einer Intensität von jeweils 150 l/(s·ha) über einen Zeitraum von je 30 Minuten gefahren. Die Trockenperioden zwischen den Beregnungen betrugen zwei, vier und 15 Stunden. Das erste Beregnungsintervall erfolgte nach einer vorhergehenden Trockenphase von ≥ 24 Stunden.

Obwohl der Pflasterbelag über einen Zeitraum von 24 Stunden mit über 100 mm beregnet wurde, konnte selbst bei kürzeren Trockenperioden keine übermäßige Aufsättigung der Tragschicht beobachtet werden. Zudem konnte im Rahmen der Laborversuche – unabhängig vom Kolmationsgrad der Pflasterfläche – kein besonders ausgeprägter Zusammenhang zwischen dem Versickerungsvermögen und der Dauer der Trockenperiode vor einer intensitätsstarken Beregnung festgestellt werden.

Neben der Analyse der Abflussbildungs- und Versickerungsprozesse wurden aus den Messergebnissen der umfangreichen Beregnungsversuche Abflussbeiwerte abgeleitet. Auf eine ausführliche Darstellung wird an dieser Stelle jedoch verzichtet und auf den ausführlichen Abschlussbericht verwiesen.

Neben der intensiven Beprobung von Pflasterflächen aus Doppelverbundsteinen wurden auch Versuche an fugenarm verlegten Rechtecksteinen durchgeführt. Beide Pflasterungen weisen ganz ähnliche Fugenanteile auf, die bei Fugenweiten

von 3-4 mm jeweils in der Größenordnung von 4-5% liegen. Als Fugenfüllmaterial wurde für beide Pflasterdeckungen gewaschener Sand verwendet. Sowohl im Neuzustand als auch im Gebrauchszustand[16] wurden bei den betrachteten Beregnungsintensitäten von 25-1000 l/(s·ha) keine nennenswerten Differenzen zwischen den Infiltrationsraten beobachtet. Die unterschiedliche Form der Pflastersteine sowie die Unterschiede im Fugenbild scheinen ebenfalls keinen Einfluss auf das Versickerungsvermögen zu haben, solange das Fugenmaterial und der Fugenanteil nahezu gleich sind.

4.2.2 Fugenarm verlegte Plattenbeläge

Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurden drei verschiedene Plattenbeläge betrachtet, die sich durch die Abmessungen der Betonplatten unterscheiden. Untersucht wurden quadratische Platten mit Seitenlängen von 30 cm, 40 cm und 50 cm, die mit einer Fugenweite von jeweils 3-4 mm in Sand verlegt waren (Abbildung 10). Aufgrund der unterschiedlichen Plattenformate weisen die Beläge differierende Fugenanteile von 0,6%, 1,2% sowie 1,8% auf.

Abbildung 10: Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten

Die drei Plattenbeläge wurden jeweils für den Neuzustand sowie für einen Gebrauchszustand mit deutlich ausgeprägten Kolmationsgrad untersucht. Der Feinpartikeleintrag in die Fugen wurde hierbei durch auftragen und einspülen einer Quarzmehlmenge von 500 g/m² nachgebildet. Das Oberflächengefälle betrug jeweils 2,5%. Die Beregnungsversuche erfolgten mit konstanten Intensitäten von 100 l/(s·ha) bis 300 l/(s·ha). Darüber hinaus wurde ein Versuchszyklus gefahren, bei dem der Plattenbelag mit einem Fugenanteil von 1,2% auf einer dünneren Tragschicht von lediglich 25 cm lag, die über einer gering durchlässigen Untergrundschicht angeordnet war. Hierbei wurden auch zusätzlich noch höhere Beregnungsintensitäten betrachtet. Die resultierenden Infiltrationsraten

[16] Im Labor nachgebildet durch Auftragen und Einspülen von 400 g/m² Quarzmehl

sind für den Neuzustand in Abbildung 11, für den Gebrauchszustand in Abbildung 12 dargestellt.

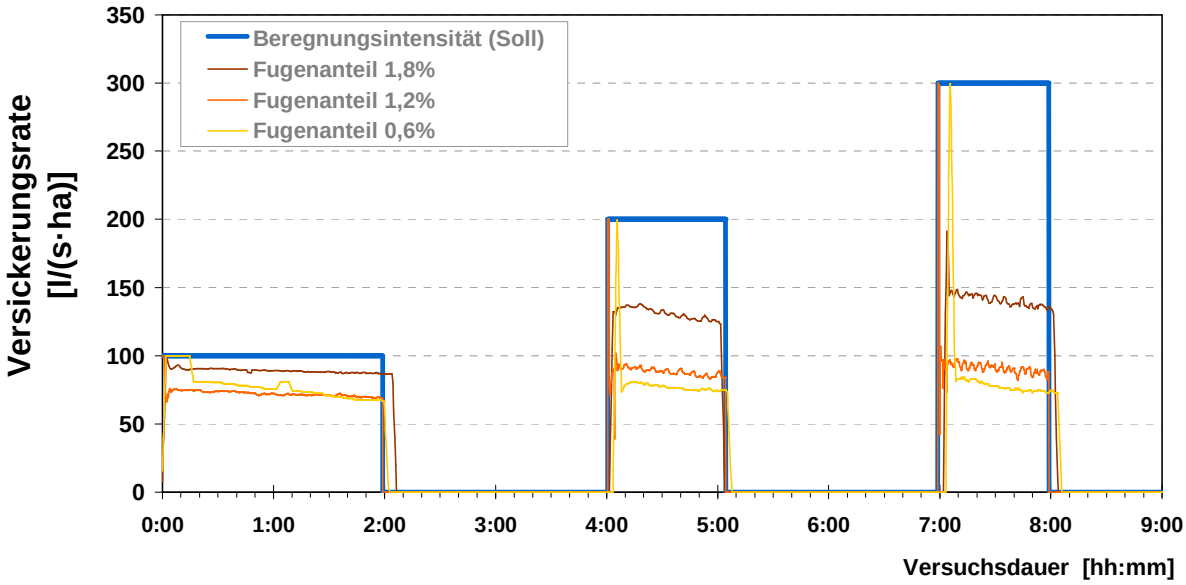


Abbildung 11: **Infiltrationsverläufe der untersuchten Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten im Neuzustand (Gefälle 2,5%)**

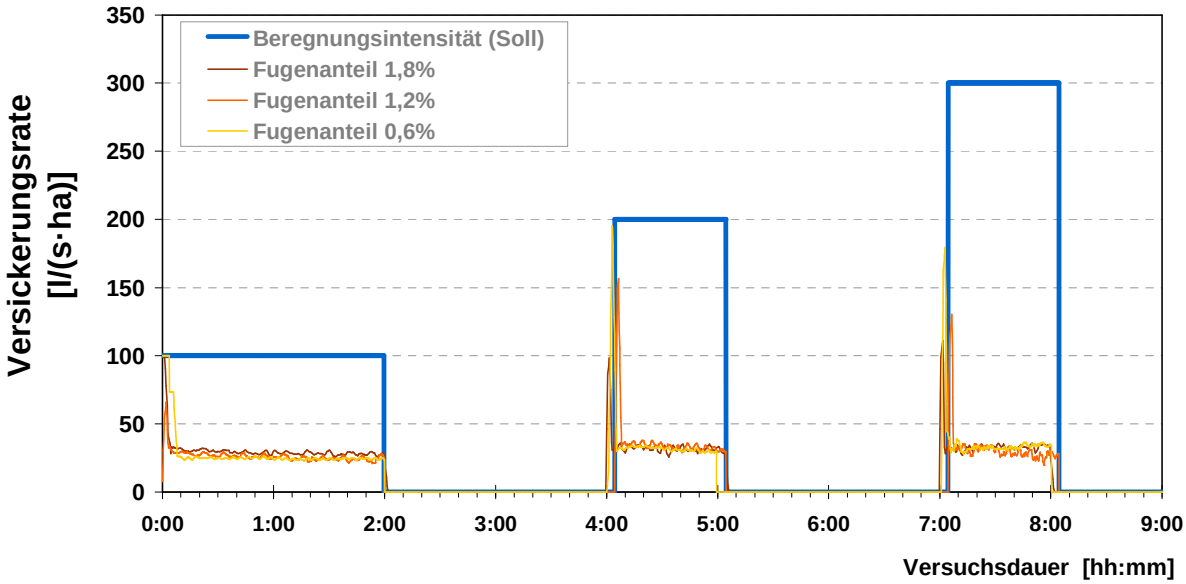


Abbildung 12: **Infiltrationsverläufe der untersuchten Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten im Gebrauchszustand (Gefälle 2,5%)**

Für den Neuzustand resultieren ähnlich wie bei den fugenarmen Pflasterbelägen Versickerungsraten, die mit der Höhe der Beregnungsintensität ansteigen und im Verlauf der Beregnung leicht sinken. Die unterschiedlich großen Fugenanteile wirken sich erwartungsgemäß auf die Höhe des Infiltrationsvermögens aus, allerdings nicht proportional. Für den Plattenbelag mit einem Fugenanteil von 1,8% ergaben sich mit 85-150 l/(s·ha) die höchsten Versickerungsraten. Bei

diesem Belag war auch die höchste Steigerung der Infiltrationskapazität mit steigender Beregnungsintensität zu verzeichnen. Die Infiltrationsraten der Plattenbeläge mit 1,2% und 0,6% Fugenanteil lagen insbesondere bei den höheren Beregnungsintensitäten deutlich niedriger. Sie bewegten sich im Bereich von lediglich 65-90 l/(s·ha) bzw. von 65-80 l/(s·ha).

Im Gegensatz zum Neuzustand wirkt sich der Fugenanteil im Gebrauchszustand nicht nennenswert auf das Infiltrationsvermögen aus. Hier liegen die beobachteten Versickerungsraten aller drei Plattenbeläge auf gleichem Niveau. Darüber hinaus ist auch kein nennenswerter Anstieg der Infiltrationsleistung bei steigender Beregnungsintensität zu verzeichnen, zumindest nicht bezogen auf die Absolutwerte der Versickerungsrate. Prozentual gesehen ergeben sich aufgrund der insgesamt auf niedrigem Niveau liegenden Infiltrationsraten Steigerungen von bis zu 20%. Die Veränderung der Infiltrationsrate über die Beregnungsdauer ist ebenfalls relativ gering. Für alle drei Plattenformate ergibt sich für die betrachteten Beregnungsintensitäten insgesamt eine Variationsbreite der Versickerungsrate von lediglich 25-35 l/(s·ha). Dies spricht dafür, dass die aufgetragene Quarzmehlmenge einem durchaus hohen Kolmationsgrad entspricht.

Der Einfluss eines gering durchlässigen Planums auf das Versickerungsvermögen wurde exemplarisch für den Plattenbelag mit einem Fugenanteil von 1,8% untersucht. Die 15 cm mächtige Sperrschicht wurde zu 50% aus Quarzmehl und zu 50% aus Quarzsand hergestellt. Ihr Durchlässigkeitsbeiwert liegt bei rd. $4 \cdot 10^{-7}$ m/s und ist damit um das 250-Fache kleiner als die Durchlässigkeit des Schottermaterials der Tragschicht ($\approx 5 \cdot 10^{-5}$ m/s).

Aus den Messergebnissen kann abgeleitet werden, dass eine gering durchlässige Unterlage eines Pflaster- oder Plattenbelages erst dann das Versickerungsvermögen des Deckbelages reduzieren kann, wenn mindestens bis zur Oberkante der Tragschicht ein Sättigungszustand erreicht wird. Dabei wird unterstellt, dass eine Abnahme des hydraulischen Gradienten zwischen Oberkante und Unterkante der Tragschicht keinen Einfluss auf das Versickerungsvermögen des Deckbelages hat. Erst wenn die von unten ansteigende Sättigungsfront die Bettungsschicht erreicht hat, kann sich das als maßgeblich erachtete hydraulische Gefälle zwischen der Ober- und der Unterkante der Deckschicht so weit herabsetzen, dass auch die Infiltrationsrate zurückgeht. Bei einem vollständigen Einstau des Pflaster- oder Plattenaufbaus kann die Infiltrationsrate dann maximal den Wert der gesättigten Wasserleitfähigkeit des Planums annehmen.

Es ist jedoch davon auszugehen, dass dieser Fall bei gering bis mäßig durchlässigen Flächenbelegung nur bei extrem volumenreichen Niederschlagsereignissen auftreten kann. Je geringer das Infiltrationsvermögen der Flächenbefestigung bzw. umso stärker die Drosselwirkung des Deckbelages ist, umso unwahrscheinlicher wird das Eintreffen eines solchen Zustandes. Bei stark durchlässigen Flächenbelägen auf gering durchlässiger Unterlage können dagegen auch volumen-

reiche Starkniederschlagereignisse zu einem Einstau des gesamten Oberbaus führen, da ein höherer Anteil des Niederschlages in den Belag infiltrieren kann. Dennoch ist das Speichervolumen des Oberbaus selbst bei einer geringen Mächtigkeit der Tragschicht von lediglich 20-30 cm derart groß, dass Regenhöhen von deutlich über 50 mm erforderlich sind, um den Porenraum der Tragschicht zu sättigen.[17]

4.2.3 Pflasterbeläge mit aufgeweiteten Sickerfugen

Die Laborversuche umfassten verschiedene Versuchsserien an zwei Pflasterbelägen, die mit weiteren und mit Splitt verfüllten Fugen ein deutlich höheres Versickerungsvermögen aufweisen als die zuvor betrachteten Pflastertypen. Bei beiden Sickerfugenbelägen handelte es sich um eine Pflasterung aus gefügedichten Betonsteinen, die mit unterschiedlichen Fugenweiten von 7 mm sowie von 10 mm im Fischgrätverband verlegt waren (Abbildung 13). Sowohl für die Bettung als auch zur Verfüllung der Fugen wurde jeweils ein Splitt mit Körnung 2/5 mm verwendet. Die betrachteten Beregnungslastfälle sahen sequenzielle Beregnungen mit hohen Intensitäten (400-1000 l/(s·ha)) mit nur kurzen Trockenpausen sowie Einzelberegnungen (100-300 l/(s·ha)) mit längeren Trockenphasen von bis zu mehreren Tagen vor.

Abbildung 13: Flächenbeläge aus Betonsteinen mit splittverfüllten Sickerfugen

Zur Nachbildung verschiedener Kolmationsgrade wurden die Beläge mit ganz unterschiedlichen Mengen und in unterschiedlichen Abstufungen mit Quarzmehl beaufschlagt (maximal 8600 g/m²). Trotz der teilweise extrem großen Mengen

[17] Beispiel: Bei einer geringen Tragschichthöhe von lediglich 20 cm mit einem Porenvolumen von 45% ergibt sich unter Berücksichtigung eines Anfangswassergehaltes von 10% ein nutzbares Porenvolumen von 200 mm x 35% = 70 mm.

an Quarzmehl, die auf die Flächen aufgestreut und anschließend in die Fugen gespült wurden, entstanden keine nennenswerten Oberflächenabflüsse. Die Ergebnisse belegen, dass aufgeweitet splittgefüllte Sickerfugen gegenüber schmaleren und sandgefüllten Fugen vergleichsweise unanfällig gegenüber einem Eintrag von Feinpartikeln sind.

Die Wasserdurchlässigkeit der Splittfüllung in den Fugen ist derart groß, dass selbst hohe Beregnungsintensitäten wie für die in Abbildung 14 dargestellte Intensität von 300 /(s·ha) problemlos und vollständig durch den Oberbau versickern kann. Dabei setzte bereits nach nur 15 Minuten nach Start der Beregnung der Sickerabfluss aus der Tragschicht ein und stieg sofort sehr rasch an. Innerhalb von fünf Minuten wurden bereits Sickerabflussraten in der Größenordnung der Beregnungs- bzw. Infiltrationsrate erreicht; ein homogener Strömungszustand stellte sich bereits 35 Minuten nach Einsetzen der Beregnung ein.

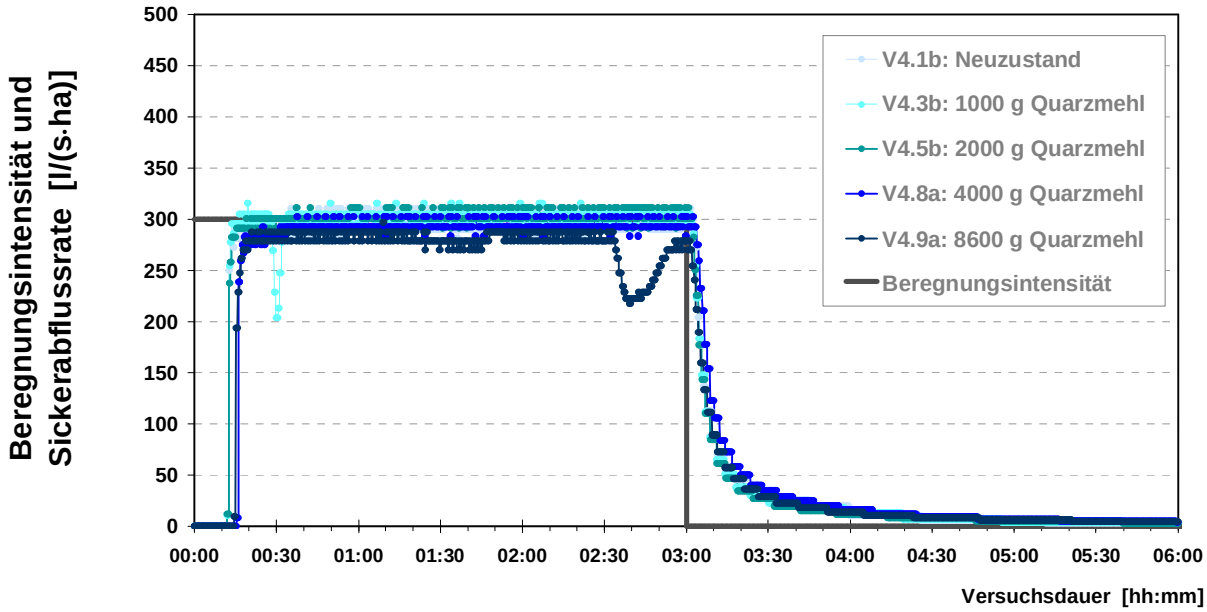


Abbildung 14: Sickerabflussraten eines Pflasterbelages mit splittverfüllter Sickerfuge von 10 mm Breite bei unterschiedlichen Quarzmehlmengen (Beregnungsintensität 300 l/(s·ha)[18]

Wie in Abbildung 14 dokumentiert ergaben sich für die verschiedenen Beregnungsversuche an diesem Belag bei den unterschiedlichen Quarzmehlbeaufschlagungen von bis zu 8600 g/m² nahezu identische Ergebnisse. Die hohe Überein-

[18] Der bei Versuch 4.9a aufgetretene Einbruch der Sickerabflussrate gegen Ende der Beregnung rührt aus einem Problem der Beregnungsanlage her, dass zu einer zeitweilig deutlich geringeren Beregnungsintensität führte. Dass sich dies so eindrücklich in der Sickerabflussrate dokumentiert unterstreicht die rasche Reaktion des (sehr durchlässigen) Bodenkörpers auf Veränderungen in der Niederschlagsbelastung.

stimmung in den Messwerten, die sich ebenso wie für die Sickerabflussrate auch bei den Wassergehaltsmessungen der TDR-Sonden zeigt, unterstreicht einerseits die solide und zutreffende Erfassung der Messwerte. Andererseits belegt sie aber auch, dass im Rahmen der Laborversuche mit dem verwendeten Quarzmehl keine nennenswerte Kolmation des Pflasterbelages erzielt werden konnte.

Dabei ist nicht davon auszugehen, dass ein Pflasterbelag mit splittverfüllten Fugen im Gebrauchszustand immer eine derart hohe Infiltrationskapazität dauerhaft aufrecht erhalten kann. Ein Versickerungsvermögen von deutlich über 500 l/(s·ha) wird jedoch in den meisten Fällen auch nach mehrjähriger Nutzung noch erreicht. Dies haben sowohl die exemplarischen Infiltrometermessungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes als auch die umfangreicheren Messungen der FH Bochum[19] belegt. Wie häufig und unter welchen Randbedingungen eine massive Kolmation dieses ansonsten hoch durchlässigen Pflastertyps in der Praxis vorkommt, kann bislang nicht quantifiziert werden. Die Beprobung des Versickerungsvermögens durch die FH Bochum ergab jedoch lediglich in vier von insgesamt 15 Messungen eine Infiltrationsrate, die nach 30 Minuten unter 500 l/(s·ha) lag (entspr. rd. 25%). Die vorliegende Datenbasis reicht aber sicherlich noch nicht aus, um fundierte statistische Kennwerte daraus ableiten zu können.

Für die Pflasterbeläge in singulärer Anordnung ohne Tragschicht, lediglich auf einer dünnen Bettungsschicht liegend, ergaben sich Infiltrationsraten, die sich nicht nennenswert von den Ergebnissen bei regulärer angeordneter Tragschicht unterscheiden. Aufgrund der hohen Durchlässigkeit des Fugenmaterials ergaben sich darüber hinaus kaum Unterschiede zwischen den Belägen mit 7 mm und mit 10 mm Fugenweite (Fugenanteile 10% bzw. 14%).

Die Ergebnisse unterstreichen, dass auch für den hier untersuchten Flächenaufbau ausschließlich aus sehr wasserdurchlässigen Baustoffen keine Beeinträchtigung des Versickerungsvermögens des Deckbelages durch die darunter befindlich Tragschicht erfolgt. Die Tragschicht ist in der Lage, Infiltrationsraten von über 1000 l/(s·ha) abzuführen.

4.2.4 Poröse Pflasterbeläge aus haufwerksporigen Betonsteinen

Beläge aus Porenbetonpflaster wurden im Rahmen der beiden Versuchsserien 5 und 6 untersucht (vgl. Tabelle 4). Betrachtet wurden dabei Porenbetonsteine zweier unterschiedlicher Hersteller (Klostermann, behaton). Einer dieser beiden Beläge war auch Bestandteil der in-situ-Messungen mittels Tropfinfiltrometer

[19] Nolting et al. (2005)

gewesen. Aufgrund des weitgehend autarken Versickerungsverhaltens der Deckschicht wurde bei den Versuchen auf eine Platzierung der Pflasterung auf einer Tragschicht verzichtet und nur die singuläre Anordnung auf einer Bettungsschicht betrachtet.

Die beiden Beläge bestanden aus rechteckförmigen bzw. quadratischen Porenbetonsteinen, die mit schmalen Fugenweiten von lediglich 3-4 mm verlegt waren (siehe Abbildung 15). Als Fugenmaterial wurde den Herstellerangaben entsprechend jeweils feiner Splitt mit einer Körnung von 1/3 mm verwendet. Die Bettungsschicht war aus einem gröberen Splitt mit Körnung 2/5 mm aufgebaut.

Abbildung 15: Flächenbeläge aus porösen Betonsteinen

Die Ergebnisse der Laborversuche stellen sich ganz ähnlich dar wie für die ebenfalls äußerst durchlässigen Sickerfugenbeläge. Auf eine grafische Darstellung der Messwerte wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Obwohl durchaus große Quarzmehlmengen von bis zu 2000 g/m² auf die Flächen aufgetragen und in den Fugenraum bzw. die Deckschicht eingespült wurden, entstanden selbst bei hohen Beregnungsintensitäten von bis zu 1000 l/(s·ha) keine Oberflächenabflüsse. Trotz der deutlich schmäleren Fugenweiten von lediglich 3-4 mm und des nicht ganz so grobkörnigen Fugenmaterials wurde auch bei diesem Belagstyp ein Großteil des beaufschlagten Quarzmehls durch die Fugen transportiert, so dass sich keine geschlossene Feinpartikelschicht auf den Fugen gebildet hat. Ebenso wenig hat sich eine abdichtende Schlämmschicht auf den Oberflächen der porösen Betonsteine ausgebildet (siehe Abbildung 15). Dabei erfolgt der Transport der Feinpartikel sowohl über die Fugen als auch über die porösen Pflastersteine selbst bis in die Bettungs- und ggf. die Tragschicht.

Das hohe Versickerungsvermögen im Rahmen der Laborversuche bestätigt die Ergebnisse der Infiltrometermessungen, bei denen – von einem Messpunkt abgesehen – ausschließlich Infiltrationsraten über 1000 l/(s·ha) gefunden wurden.

Auch wenn in den Laborversuchen keine ausgeprägten Kolmationsgrade betrach-

tet werden konnten, repräsentieren die Ergebnisse dennoch das Versickerungsvermögen von Porenbetonflächen, wie es meist an Bestandsflächen anzutreffen ist. Eine statistische Nachbearbeitung der Messdaten der FH Bochum[20] von 34 Porenbetonflächen hat bspw. ergeben, dass bei rd. 60% der dort untersuchten Beläge auch nach mehrjähriger Nutzung eine Infiltrationsleistung von ≥ 500 l/(s·ha) anzutreffen war; Infiltrationsleistungen von ≥ 250 l/(s·ha) gar an 70% der untersuchten Flächen.

Auch ein erhöhtes Oberflächengefälle erbrachte in den Laborversuchen keinen Oberflächenabfluss. Bei der Testreihe mit einem Oberflächengefälle von 7,5% ist die aufgebrachte Beregnung von bis zu 1000 l/(s·ha) ebenso vollständig versickert wie bei geringerem Gefälle von 2,5%. Ohnehin ist bei einer porösen Pflasterdecke, bei der die komplette Grundfläche versickerungsfähig ist, mit einem deutlich geringeren Einfluss der Oberflächenneigung auf das Infiltrationsvermögen zu rechnen, als dies bei Pflasterbelägen der Fall ist, bei denen die Versickerung ausschließlich über die Fugen erfolgt. Falls der auftreffende Niederschlag nicht unmittelbar an Ort und stelle versickern kann, hat er auf seinem vollständigen Fließweg die Möglichkeit, in den Oberbau zu infiltrieren. Aufgrund der rauen Oberfläche poröser Betonsteine ist zudem die Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses vermutlich deutlich keiner als bei gefügedichten Betonsteinen.

4.3 Charakterisierung des Versickerungsprozesses anhand der Untersuchungsergebnisse

Das Versickerungsverhalten verschiedener Pflasterbauweisen wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes anhand von Messungen an Bestandflächen sowie umfangreichen Lysimeterversuchen im Labor untersucht. Auf dieser Basis, zusammen mit zusammen getragenen Erkenntnissen früherer Untersuchungen, kann der Infiltrationsprozess wie folgt charakterisiert werden.

Eine Pflasterfläche weist generell einen schichtweisen Aufbau auf, wobei sich die einzelnen Schichten hinsichtlich ihres Versickerungsvermögens erheblich unterscheiden können. Die Tragschicht besteht i.d.R. aus sehr grobkörnigen, aber stark verdichteten Mineralstoffgemischen mit Durchlässigkeiten in der Größenordnung von $5 \cdot 10^{-4}$ m/s bis $5 \cdot 10^{-5}$ m/s und ist ebenso wie die wenige Zentimeter mächtige Pflasterbettung über die gesamte Grundfläche versickerungsfähig. Die Durchlässigkeit des Bettungsmaterials hängt in hohem Maße von dessen Kör-

[20] Nolting, B. et al. (2005)

nungsstruktur ab. Sandiges Material ist dabei i.d.R. deutlich weniger durchlässig als Splitt. Dennoch stellt auch die Pflasterbettung im Regelfall keine nennenswerte hydraulische Barriere für in den Oberbau einsickerndes Wasser dar.

Das Infiltrationsvermögen einer versickerungsfähig ausgebildeten Flächenbefestigung wird in aller erster Linie von der Infiltrationsfähigkeit des Deckbelages bestimmt. Dabei hängt die Versickerungskapazität der Deckschicht u.a. vom versickerungsaktiven Flächenanteil, den verwendeten Materialien sowie von ihrem Oberflächengefälle ab. Zudem kann die Nutzung der Fläche bspw. durch Fahrzeuge das kleinräumige Infiltrationsvermögen erheblich beeinträchtigen.

Mit Ausnahme von porösen Flächenbelägen erfolgt die Versickerung bei Pflasterbelägen ausschließlich über Fugen zwischen den gefügedichten Pflastersteinen. Je größer der Fugenanteil einer Fläche ist, umso höher ist daher prinzipiell ihr Versickerungsvermögen. Die Höhe der Infiltrationsleistung hängt jedoch ganz wesentlich von den für die Fugenfüllung verwendeten Materialien ab. Hier gilt oben Genanntes analog: je feinkörniger das Fugenmaterial ist, umso geringer ist auch die Versickerungsleistung bezogen auf die Fugenfläche. Hierbei weisen Splitte eine ungleich größere Versickerungskapazität auf als Sande.

Neben der grundsätzlichen Durchlässigkeit der Fugenfüllmaterialien begrenzen vor allem in den Fugenraum eingetragene Feinpartikel das Infiltrationsvermögen der Deckschicht. Im Laufe der Standzeit einer Flächenbefestigung bilden feine mineralische und organische Körner zusammen mit anthropogen bedingten Stäuben[21] eine Sedimentationsschicht an der Oberfläche des Fugenraumes, der zu einer erheblichen Reduktion des Versickerungsvermögens führen kann. Dieser als Kolmation bezeichnete Prozess kann je nach Standort und Nutzung in ganz unterschiedlicher Ausprägung auftreten und ist hauptsächlich dafür verantwortlich, dass das Infiltrationsvermögen nach mehrjähriger Nutzung in einem ganz erheblichen Maß variieren kann und nicht vorhersagbar ist. Die Anlagerung von Feinpartikeln in den Fugen kann bei feinkörnigerer Fugenfüllung dabei deutlich leichter und dadurch rascher erfolgen als bei grobkörnigeren Fugenfüllungen, bei denen Feinpartikel den Fugenraum passieren können.

Die Oberflächenneigung einer Fläche wirkt generell einer Infiltration des auftreffenden Regenwassers entgegen. Dabei ist der Einfluss des Oberflächengefälles umso ausgeprägter, je geringer das Versickerungsvermögen der Flächenbefestigung ist. Je kleiner der Fugenanteil, je geringer die Durchlässigkeit des Fugenmaterials und je höher der Kolmationsgrad einer Flächenbefestigung ist, umso stärker nimmt das Versickerungsmögen bei steigendem Gefälle ab. Daher spielt das Oberflächengefälle bei fugenarmen Pflasterbauweisen mit gefügedichten

[21] z.B. aus verkehrlicher Nutzung (Abrieb von Reifen, Bremsbelägen etc.)

Pflastersteinen eine größere Rolle als bei Flächenbelägen mit einem hohen Anteil an meist splittgefüllten Fugen oder Kammern. Bei porösen Flächenbefestigungen konnte bislang sogar keinerlei negative Beeinträchtigung des Infiltrationsvermögens nachgewiesen werden.

Das momentane Infiltrationsvermögen einer konkreten Flächenbefestigung – also bei bestimmtem Aufbau, bestimmtem Oberflächengefälle sowie bestimmten Kolmationsgrad – wird ganz wesentlich von der jeweiligen Niederschlagsbelastung beeinflusst. Sowohl Messungen an Bestandflächen[22] als auch die Lysimeterversuche im Rahmen dieses Forschungsprojektes haben einen signifikanten Zusammenhang zwischen der momentanen Infiltrationsrate und der jeweiligen Regen- bzw. Beregnungsintensität ergeben. Dabei kann die Infiltrationsleistung einer Pflasterfläche mit steigender Niederschlagsintensität z.T. deutlich ansteigen. Dies führt u.a. auch dazu, dass selbst bei vergleichsweise geringen Niederschlagsintensitäten bereits ein merklicher Oberflächenabfluss einsetzen kann, obwohl der Flächenbelag im Stande ist, bei etwas höheren Regenintensitäten noch weitaus mehr Wasser aufzunehmen. Das Einsetzen des Oberflächenabflusses markiert also nicht den Zeitpunkt, an dem das Versickerungsvermögen des Flächenbelages erschöpft ist. Es kennzeichnet lediglich die Phase der Beregnung, in der die Infiltrationskapazität der am geringsten durchlässigen Flächenbereiche überschritten ist und der an diesen Stellen nicht direkt versickerbare Regenwasseranteil auch nicht auf angrenzenden Flächenbereiche in den Oberbau infiltrieren kann.

Verantwortlich für dieses Phänomen ist vermutlich die Variabilität im kleinräumigen Versickerungsvermögen entlang der Fugen. Bei geringeren Regenintensitäten wird dadurch die maximal mögliche Infiltrationsleistung nicht an allen Stellen des Fugenraumes ausgenutzt. Bei höheren Intensitäten werden diese Potenziale dagegen immer stärker ausgeschöpft, bis ein Maximum erreicht ist. Darüber hinaus können präferierte Fließwege an den Ober- und Seitenflächen der Pflastersteine sowie die mit steigendem Sättigungsgrad zunehmende Wasserleitfähigkeit des Fugenmaterials zu diesem Effekt beitragen.

Der Infiltrationsverlauf über die Zeit ist durch eine mitunter sehr hohe Infiltrationsrate zu Beginn eines Regenereignisses gekennzeichnet, die im weiteren Verlauf rasch abnimmt und auf einem nahezu konstanten Niveau verharrt. Die hohen Anfangsinfiltrationsraten rühren in erster Linie daher, dass zunächst die Porenräume des Fugenmaterials (und ggf. des Bettungsmaterials) gefüllt werden müssen, bevor das Wasser tiefer in den Oberbau perkolieren kann. Sie entsprechend also nicht der hydraulischen Leitfähigkeit der Deckschicht, die deutlich geringer sein kann. Die Auffüllung des Porenraums erfolgt dabei aufgrund des

[22] Timmermann, U. (1998); siehe Kap. 2.2

deutlichen höheren Anteils an weiten und engen Grobporen wesentlich schneller als bei natürlichen Böden, so dass meist nach 5-10 Minuten bereits eine nahezu konstante Versickerungsrate zu beobachten ist.

Je nach hydraulischem Gradienten zwischen der Oberkante des Fugenraumes und der Pflasterbettung sowie dem Sättigungsgrad des Fugenmaterials kann die Infiltrationsrate bei konstanter Regenintensität im weiteren Verlauf geringfügig zu- oder abnehmen. Dabei konkurriert die mit zunehmendem Sättigungsgrad ansteigende Wasserleitfähigkeit des Fugenmaterials mit dem sinkenden Potenzialgefälle in den Fugen. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der beaufschlagten Niederschlagshöhe und der Versickerungsrate konnte indessen nicht festgestellt werden. Allerdings ist über die Einzelprozesse, die in den Fugen während des Versickerungsvorganges im Detail ablaufen, sowie ihre Wechselwirkungen untereinander bislang noch sehr wenig bekannt.

Der Sättigungsgrad in der Tragschicht spielt dagegen nur eine untergeordnete Rolle und beeinflusst die Infiltrationsleistung des Deckbelages i.d.R. nicht. Ohnehin resultiert aufgrund des hohen Anteils an Grobporen aus der Infiltration von Niederschlagswasser in den Oberbau nur ein vergleichsweise moderater Anstieg der Wassergehalte in der Tragschicht. Umso stärker der Zufluss durch das Infiltrationsvermögen der Deckschicht begrenzt wird, umso geringer fällt dabei natürlich auch die Befeuchtung der Tragschicht aus. Zudem ist die am Infiltrations- bzw. Perkolationsprozess beteiligte Grundfläche bei der Tragschicht ungleich größer als bei der Deckschicht, insofern die Versickerung dort nur über die Fugen erfolgt. Sättigungsgrade $\geq$ 50% werden daher in der Tragschicht nur selten erreicht.

Darüber hinaus weist die Tragschicht ein außerordentlich großes Speichervermögen auf. Selbst bei Auflage auf einem nur gering durchlässigen Planum ist ein sehr großes Infiltrationsvolumen von i.d.R. deutlich über 50 mm erforderlich, um einen vollständigen Einstau der Tragschicht hervorzurufen. Doch nur für diesen Fall ergibt sich eine Rückkopplung auf das Versickerungsvermögen der Gesamtkonstruktion.

Inwiefern die Versickerungsleistung von der Vorsättigung des Fugenmaterials bestimmt wird, kann bislang nicht eindeutig beantwortet werden. Die Laborversuche ergaben hier kein ganz eindeutiges Bild. Intervallartige Beregnungen mit unterschiedlichen Trockenperioden zwischen den Beregnungsphasen ergaben jedoch für einen fugenarmen Pflasterbelag aus Doppelverbundsteinen eine bis zu 10% reduzierte Infiltrationsrate zwischen Trockendauern von zwei und von 24 Stunden. Feldmessungen u.a. von Nolting et al. ergaben für weitaus durchlässigere Pflastertypen dagegen deutlich größere Unterschiede zwischen feuchtem

und trockenem Zustand von über 50%.[23] Diesbezüglich herrscht sicherlich noch Forschungsbedarf. Die Quantifizierung klimatisch bedingter Einflüsse auf das Versickerungsvermögen stellt jedoch eine wichtige Voraussetzung dar, um Infiltrationsprozesse auch bei Kontinuumsbetrachtungen sachgerecht beschreiben und erfassen zu können.

4.4 Mathematische Beschreibung des Versickerungsprozesses auf wasserdurchlässigen Flächenbelägen

Der bislang meist verwendete Modellansatz nach Horton zur Simulation des Abflussbeitrages durchlässig befestigter Siedlungsflächen ist nicht in der Lage, mit einem einheitlichen Parametereinstellungen sachgerechte Ergebniswerte über das gesamte Niederschlagsspektrum hinweg zu liefern. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes versucht, aus der umfangreichen Datenbasis ein verbessertes Konzept zur mathematischen Beschreibung des Abfluss- und Versickerungsverhaltens abzuleiten. Dabei wurde nicht angestrebt, einen neuen Software-Baustein zu entwickeln, sondern lediglich ein Modellkonzept, das als Grundlage einer späteren programmtechnischen Umsetzung dienen soll.

4.4.1 Konzeption des Berechnungsmodells

Aus den Ergebnissen der Feld- und Labormessungen lassen sich die wesentlichen Einzelprozesse der Abflussbildung wasserdurchlässiger Flächenbeläge, die in den Modellansatz integriert sein sollen, wie folgt ableiten:

- Interzeption der Oberfläche und Auffüllung von Mulden
- flächenspezifische Infiltrationsrate in Abhängigkeit von der Niederschlagsbelastung, dem Oberflächengefälle und dem Kolmationsgrad
- Speicherfunktion der Tragschicht
- Drosselwirkung eines gering durchlässigen Planums (ggf. verbunden mit einem Einstau der Tragschicht)
- Begrenzung der Infiltration in den Oberbau durch eingestaute Tragschicht.

Zur Berücksichtigung dieser Anforderungen wurde ein bi-direktionales Schichtenmodell entworfen. Das Modell folgt in seiner Systemlogik dem prinzipiellen Aufbau einer versickerungsfähig ausgebildeten Flächenbefestigung, die sich aus

[23] Nolting, B. et al. (2005)

einer teildurchlässigen Deckschicht, einer volldurchlässigen Unterlage (Bettungs- und Tragschicht) sowie einem mehr oder weniger durchlässigen Planum zusammen setzt. Dabei berücksichtigt das Modell die wesentlichen Einzelprozesse einschließlich ihrer zeitlichen Abfolge und kann daher als empirisch-deterministischer Modellansatz bezeichnet werden. Ein Schema des Schichtenmodells ist in Abbildung 16 dargestellt.

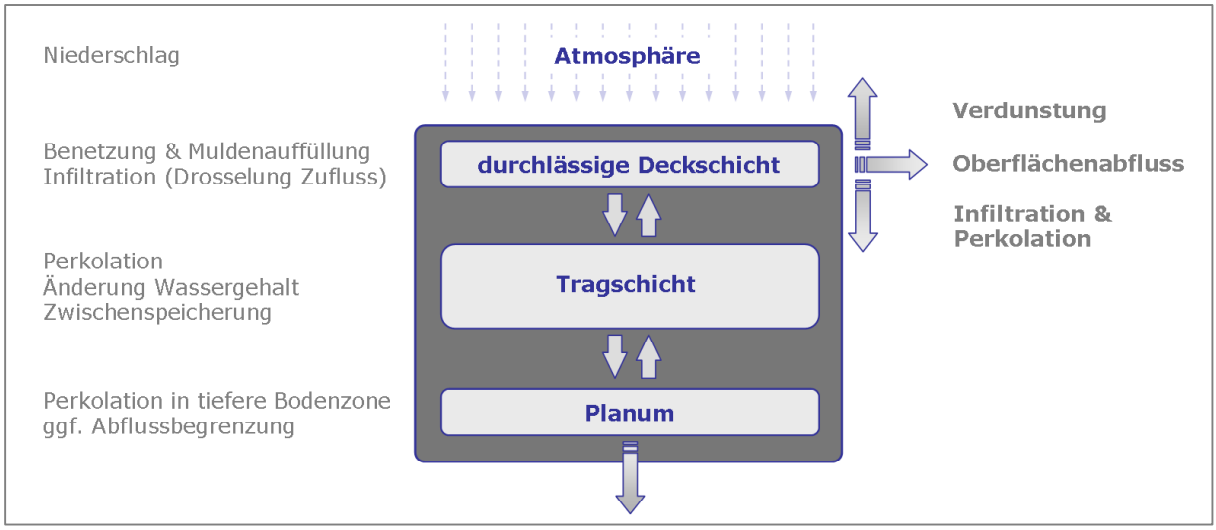


Abbildung 16: Schema des bi-direktionalen Schichtenmodells

Den Kern des Modells bildet ein Infiltrationsmodul, bei dem der Versickerungsvorgang über einen mathematischen Algorithmus bilanziert wird, der die Infiltrationsrate in Abhängigkeit von der aktuellen Niederschlagsintensität und der Regendauer beschreibt. Der Kolmationsgrad und das Oberflächengefälle werden über entsprechende flächenspezifische Parameterwerte erfasst. Die Niederschlagsmenge, die das aktuelle Infiltrationsvermögen übersteigt, stellt den Oberflächenabfluss dar und verlässt als Output das System.

Die Speicherwirkung der Tragschicht wird durch ein einfaches Speichermodell beschrieben. Hierbei wird der Zufluss aus der Deckschicht und der Abfluss aus der Tragschicht je Zeitschritt bilanziert. Die hydraulische Leitfähigkeit des Planums geht hier ebenso wie das Speichervolumen der Tragschicht als Berechnungsparameter ein, der sich über die Zeit nicht ändert. Für den Fall, dass das Speichervermögen der Tragschicht erreicht ist, reduziert sich die Infiltrationsrate der Deckschicht auf die hydraulische Leitfähigkeit des Planums.

4.4.2 Infiltrationsmodul

Die Abflussbildung auf wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen wird ganz wesentlich vom aktuellen Infiltrationsvermögen der Fläche bestimmt. Die Infiltrationsrate ist hierbei von der Konstruktion der Fläche als auch von der aktuellen Niederschlagsintensität abhängig.

Für den im Rahmen der Laborversuche sehr intensiv untersuchten Flächentyp eines fugenarmen Pflasterbelages aus gefügedichten Betonsteinen wurde die Korrelation von Infiltrationsrate und Niederschlagsintensität eingehend analysiert. Durch mehrfache Regressionsanalysen wurde dabei ein Berechnungsalgorithmus abgeleitet, über den die Infiltrationsrate als Funktion der Regenintensität und der Regendauer beschrieben werden kann.

In Abbildung 17 ist die Infiltrationsrate des fugenarmen Doppelverbundpflasters in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität für die vier im Labor betrachteten Kolmationsgrade aufgetragen. Der Abbildung liegen dabei die Messergebnisse an einem Belag mit 2,5% Gefälle bei einer 20-minütigen Beregnung zugrunde.

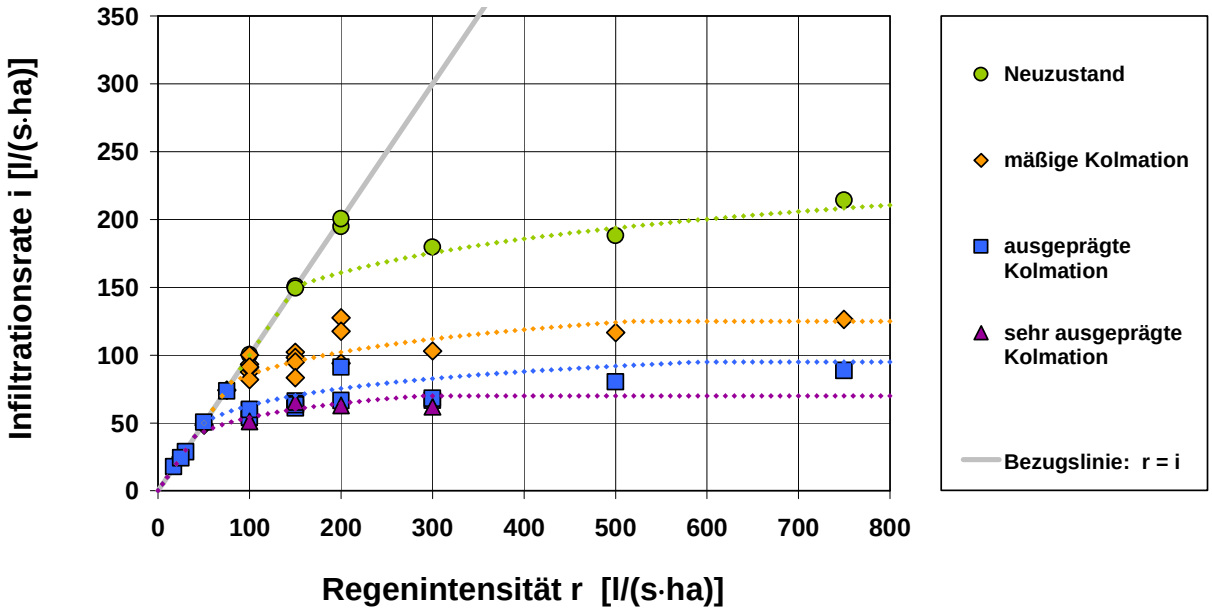


Abbildung 17: **Korrelation zwischen Infiltrationsrate und Niederschlagsintensität am Beispiel eines fugenarmen Verbundpflasters mit 2,5% Gefälle für die Dauerstufe D = 20 min**

Die mit der Beregnungsintensität ansteigende Infiltrationsrate kann durch die ebenfalls in Abbildung 17 grafisch dargestellten Regressionsfunktionen näherungsweise beschrieben werden. Je betrachteter Dauerstufe ergibt sich dabei eine andere Regressionsfunktion, da die Infiltrationsrate mit andauernder Beregnung tendenziell abnimmt. Die Regression erfolgt dabei jeweils über eine Funktion der Form:

$$f(r,D) = A \cdot \ln(r) - B \leq f_{max}$$

f: Infiltrationsrate in [l/(s·ha)] bei aktueller Regendauer D seit Ereignisbeginn
A: Regressionsparameter
B: Regressionsparameter
f_{max}: Endwert der Infiltrationsrate (nicht steigerbar; Bedingung: $f_{max} \leq r$)

Für jede Dauerstufe ergibt sich für jeden Kolmationsgrad ein unterschiedliches Parameterpaar A und B. Die maximale Infiltrationsrate f_{max} entspricht nicht der Endinfiltrationsrate, sondern beschreibt das maximale Infiltrationsvermögen einer Fläche, das auch bei weiter ansteigender Beregnungsintensität nicht weiter zunehmen kann. Auch sie nimmt mit fortlaufender Dauer eines Regenereignisses ab.

Die zeit- und intensitätsabhängigen Infiltrationsrate lässt sich durch Regression zweiter Ordnung zu folgendem Term vereinfachen:

$$f(r,D) = \alpha_1 \cdot e^{\alpha_2 \cdot f_{max(D)}} \cdot \ln(r,D) - \beta_1 \cdot \alpha_1 \cdot e^{\alpha_2 \cdot f_{max(D)}} + \beta_2 \leq f_{max}(D)$$

$$\text{mit } f_{max} = \gamma_2 + (\gamma_1 - \gamma_2) \cdot e^{-D \cdot \mu + 0,5}$$

f_{max}: Regressionsparameter 1. Ordnung
$\alpha_{1,2}$, $\beta_{1,2}$: Regressionsparameter 2. Ordnung
γ_1, γ_2, μ:: Regressionsparameter 2. Ordnung

Das Infiltrationsmodell weist sieben flächenspezifische Parameter auf. Die Zahlenwerte, die sich aus der Anpassung des Infiltrationsmodells an die Messwerte der Lysimeterversuche ergeben haben, sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Sie besitzen für den betrachteten Flächentyp eines fugenarmen Pflasterbelages bei einem Gefälle von 2,5% generelle Gültigkeit; nicht jedoch für einen anderen Belagstyp.

Tabelle 5: Zahlenwerte der Modellparameter des Infiltrationsmodells für einen fugenarmen Pflasterbelag für verschiedene Kolmationsgrade

Regressions-parameter 2. Ordnung	Neuzustand	mäßige Kolmation	ausgeprägte Kolmation	starke Kolmation
α_1	112,9	9,7	9,4	5,5
α_2	0,0058	0,0080	0,0087	0,0172
β_1	5,8	4,2	4,0	3,5
β_2	178	64	48	37
γ_1	350	250	185	100
γ_2	175	90	70	60
μ	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020

Die Abhängigkeit der Versickerungsrate vom Oberflächengefälle wird in dem o.g. Algorithmus nicht explizit berücksichtigt. Bislang sind die Kenntnisse zum Zusammenhang von Oberflächengefälle und Infiltrationsvermögen noch sehr begrenzt. Die exemplarischen Beregnungsversuche, die im Rahmen der Labormessreihe an unterschiedlichen Oberflächenneigungen durchgeführt wurden, haben eine Reduktion des Infiltrationsvermögens je nach Gefälledifferenz und Kolmationsgrad von bis 35% ergeben. Vereinfachend werden daher die in Tabelle 6 angegebenen Abminderungsfaktoren ζ_J verwendet. Die Infiltrationsrate ergibt sich schließlich durch Multiplikation der Infiltrationsrate nach o.g. Gleichung mit dem pauschalen Abminderungsfaktor: $f(J,r,D) = f(r,D) \cdot \zeta_J$.

Tabelle 6: Abminderungsfaktoren ζ_J der Infiltrationsrate in Abhängigkeit vom Oberflächengefälle

Gefälle	Neuzustand	mäßige Kolmation	ausgeprägte Kolmation	starke Kolmation
≤ 2,5%	1,00	1,00	1,00	1,00
2,5%	1,00	1,00	1,00	1,00
5,0%	1,00	0,95	0,80	0,75
7,5%	1,00	0,80	0,70	0,65
≥ 7,5%	0,95	0,70	0,65	0,60

Der Einfluss einer Trockenperiode vor Beregnungsbeginn auf das Infiltrationsvermögen kann bislang nicht eindeutig quantifiziert werden und ist daher nur vereinfacht in das Modellkonzept integriert worden. Bis zum Vorliegen weiter gehender Erkenntnisse wird daher vorgeschlagen, den Sättigungszustand vereinfachend über das Verlustpotenzial auf der Oberfläche mit zu berücksichtigen.

Das vorstehend beschriebene Infiltrationsmodell wurde im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes speziell für einen fugenarmen Pflasterbelag mit einem Fugenanteil von rd. 5% abgeleitet und entwickelt, ist aber grundsätzlich auf alle Pflastertypen anwendbar. Allerdings reichen die im Rahmen des Projektes durchgeführten Beregnungsversuche bislang nicht aus, um für das gesamte Flächenspektrum adäquate Zahlenwerte der Modellparameter bestimmen zu können. Hierzu wären weitergehende Messungen im Labor oder an Bestandflächen erforderlich. Die grundsätzliche Anwendbarkeit auch für andere Flächentypen sei jedoch exemplarisch mit nachstehender Abbildung 18 dokumentiert. Die Grafik zeigt die Gegenüberstellung der gemessenen und der mit Hilfe des Infiltrationsmodells errechneten Versickerungsraten für einen Plattenbelag mit einem Fugenanteil von 1,8% bei unterschiedlichen Kolmationsgraden.

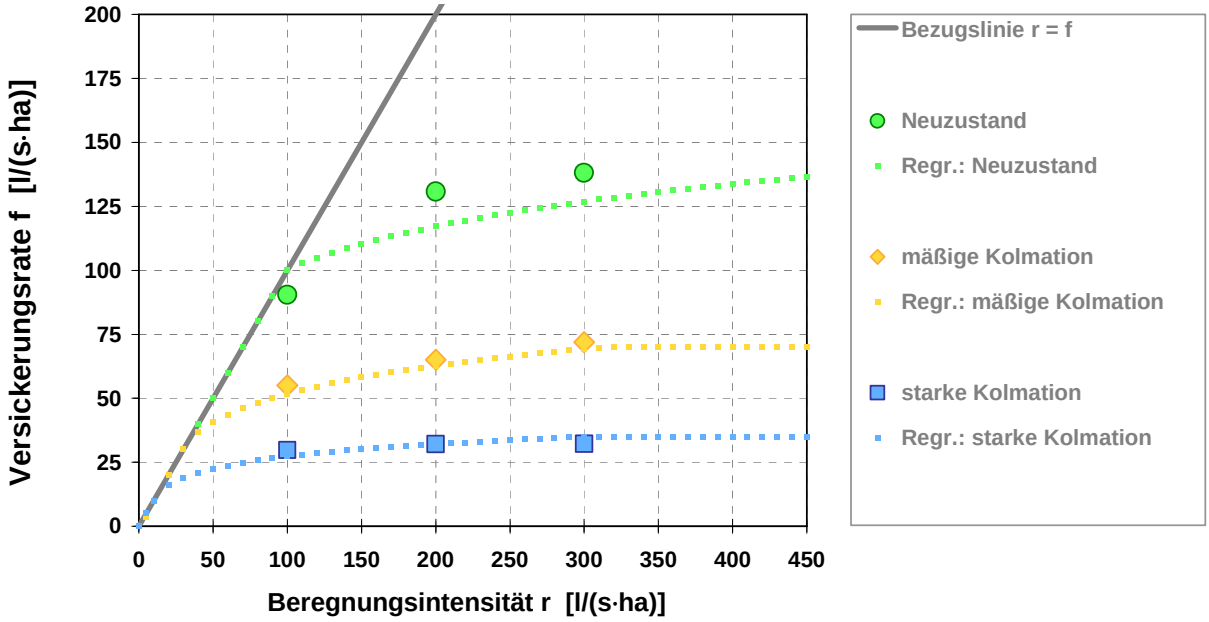


Abbildung 18: **Gegenüberstellung gemessener und errechneter Infiltrationsraten für einen Plattenbelag mit einem Fugenanteil von 1,8% bei einer Regendauer von D = 30 min**

Als Alternative zu dem vorstehend beschriebenen Ansatz wurde im Rahmen des Projektes noch ein zweiter Ansatz verfolgt, bei dem die aktuelle Infiltrationsrate als Funktion der kumulativen Niederschlagshöhe beschrieben wird. Dieser Ansatz vermag jedoch das Versickerungsvermögen bei intensitätsvariablem Niederschlag nicht so gut wieder zu geben wie der zuvor genannte Algorithmus.

4.4.3 Speichermodell

Das im Modellkonzept angedachte Speichermodell arbeitet mit deutlich weniger Parametern als das Infiltrationsmodell. Vorzugeben sind hier lediglich das Speichervolumen der Tragschicht und die hydraulische Leitfähigkeit des Planums.

Das verfügbare Speichervolumen ergibt sich aus der Mächtigkeit der Tragschicht sowie der Differenz zwischen dem Restwassergehalt Θ_R und dem Wassergehalt bei Sättigung Θ_S. Dieser Wert liegt i.d.R. in der Größenordnung von 0,40. Setzt man pauschal eine Tragschichthöhe von 20-40 cm an, ergibt sich das Speichervolumen zu 80-160 mm.

Die Aktivierung des Speichervolumens ergibt sich als Volumendifferenz zwischen Zufluss und Abfluss der Tragschicht je Berechnungszeitschritt und Flächeneinheit:

$$\Delta V = (q_{in} - q_{out}) \cdot \Delta t = (f(t) - K) \cdot \Delta t$$

ΔV: Änderung des Speichervolumens je Flächeneinheit

q_{in}: Zufluss zur Tragschicht (Infiltrationsrate f(t))
q_{out}: Abfluss aus der Tragschicht (hydraulische Leitfähigkeit K der Tragschicht)
Δt: Berechnungszeitschritt

Der Zufluss entspricht hierbei der Infiltrationsrate, der Abfluss der hydraulischen Leitfähigkeit des Planums. Die Berücksichtigung eines konstanten Wasserstromes aus der Tragschicht wird hierbei als ausreichend erachtet. Die Auffüllung des Speichervolumens der Tragschicht erfolgt, sobald der Zufluss zur Tragschicht größer als die Durchlässigkeit des Planums ist. Auf eine Berücksichtigung des zeitlich verzögerten Einsetzens des Sickerabflusses aus der Tragschicht wird in einem ersten Schritt verzichtet, könnte jedoch leicht implementiert werden.

Die Aufgabe des Speichermodells ist jedoch lediglich, die Infiltrationsrate im Falle einer Sättigung der Tragschicht auf die hydraulische Leitfähigkeit des Planums zu begrenzen. Diese Bedingung ist entsprechend in den Berechnungsgang zu integrieren. Gleichwohl reicht die vereinfachte Methodik sicher aus, um die Speicherwirkung der Tragschicht und den Effekt eines gesättigten Oberbaus mit angemessener Genauigkeit nachbilden zu können.

5 Anwendungsempfehlungen für die Urbanhydrologie

Auf der Basis der im Rahmen dieses Forschungsprojektes anhand von Literaturstudium, Feld- und Labormessungen gesammelten Ergebnisse werden nachfolgend verschiedene Bemessungskennwerte abgeleitet, die als Orientierungsgrößen zu verstehen sind. Nicht alle ausgewiesenen Werte wurden im Rahmen von Messungen ermittelt, sondern vielfach auf der Grundlagen des zusammen getragenen Kenntnisstandes sinnvoll abgeschätzt. Dabei wurde den beobachteten Zusammenhängen zwischen dem Infiltrationsvermögen und der Regenintensität, dem Oberflächengefälle sowie dem Kolmationsgrad Rechnung getragen. Die Empfehlungen umfassen in erster Linie Abflussbeiwerte zur konventionellen Abflussberechnung sowie Parameterwerte zur Anwendung von Niederschlagsabflussmodellen.

5.1 Abflussbeiwerte zur Dimensionierung entwässerungstechnischer Anlagen

Die für verschiedene versickerungsfähig ausgebildete Belagstypen abgeleiteten Abflussbeiwerte sind nachfolgend aufgeführt und spiegeln den zu erwartenden Wertebereich je nach Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Niederschlagsintensität wider. Auf eine Differenzierung nach konkretem Anwendungsfall wurde der besseren Übersichtlichkeit halber verzichtet. Die relevante Niederschlagsbelastung ergibt sich ohnehin aus dem jeweiligen Anwendungsfall. Die unterschiedlichen Definitionen der verschiedenen Abflussbeiwerte sind hierbei nur von untergeordneter Bedeutung. Die empfohlenen Werte sind daher als mittlere Abflussbeiwerte sowie als Spitzenabflussbeiwerte zur Bemessung anwendbar.

Darüber hinaus wurde auf eine Differenzierung nach der konkreten Dauer des Bemessungsregens ebenfalls verzichtet. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist bei wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen nur innerhalb der ersten Minuten mit einer deutlichen Abnahme des Versickerungsvermögens zu rechnen. Mit zunehmender Durchlässigkeit des Befestigungstyps stellen sich sogar häufig konstante Versickerungsraten ein. Die Einflussfaktoren Niederschlagsintensität, Kolmationsgrad und Gefälle schlagen hier weitaus erheblicher zu Buche, so dass die –

dennoch nicht ganz sachgerechte – Vernachlässigung der Regendauer die insgesamt existente Ungenauigkeit nicht in nennenswertem Umfang erhöht. Überdies liegen bislang zu wenige Kenntnisse vor, inwiefern sich die Versickerungskapazität je nach Regendauer und Sättigungszustand ändert. Abnehmende wie auch ansteigende Infiltrationsraten wurden hier schon beobachtet.

Die hier ausgewiesenen Abflussbeiwerte wurden jeweils mit Bezug auf eine Regendauer von rd. 30 Minuten gewählt. Bei der Betrachtung besonders kurzer Niederschlagsereignisse sollten die angegebenen Abflussbeiwerte dennoch in sinnvollem Maße abgemindert werden. Umgekehrt können die Werte bei der Betrachtung ausgesprochen lang anhaltender Niederschlagsbelastungen entsprechend geringfügig erhöht werden. Dies liegt jedoch im Ermessen des Anwenders.

Generell wird zwischen fünf verschiedenen Kolmationsgraden unterschieden. Der Zustand einer extremen Kolmation stellt dabei eine Art worst case dar, der durch eine außerordentliche Reduktion des Versickerungsvermögens gegenüber dem Neuzustand gekennzeichnet ist. Dennoch wurde allen betrachteten Belagstypen auch in diesem Fall noch eine geringe Infiltrationsleistung zugesprochen. Gleichwohl können in der Praxis gelegentlich Flächenbefestigungen vorkommen, bei denen die Versickerung örtlich in noch stärkerem Maße durch äußere Einflüsse unterbunden ist.

Die Differenzierung enthält darüber hinaus keinerlei stochastische Bewertung hinsichtlich der Eintretenswahrscheinlichkeit der einzelnen Kolmationsgrade. Verwertbare Erkenntnisse liegen diesbezüglich bislang nicht bzw. nur in sehr begrenztem Umfang vor, stellen aber eine unabdingbare Voraussetzung für eine solche Zuordnung dar. Hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

Neben Niederschlagsbelastungen von 0-500 l/(s·ha) und den o.g. fünf Kolmationsgraden umfassen die Empfehlungen vier verschiedene Gefällestufen. Bei der Ausweisung der Abflussbeiwerte wurde hierbei berücksichtigt, dass das Oberflächengefälle umso stärker zu Buche schlägt, je geringer das Versickerungsvermögen einer Fläche ist. Der Einfluss des Gefälles wurde entsprechend umso stärker bewertet, je geringer der Anteil versickerungsaktiver Fugen, je geringer durchlässig die Fugenfüllung und/oder umso ausgeprägter die Kolmation der Fläche vorangeschritten ist.

Abbildung 19 zeigt die je nach Regenintensität, Kolmationsgrad und Gefälle anzutreffende Bandbreite des Abflussbeiwertes für fugenarm verlegte Plattenbeläge. Befestigungen aus Beton- oder Natursteinplatten weisen aufgrund der im Vergleich zu Pflastersteinen größeren Plattenformate üblicherweise deutlich geringere Fugenanteile auf als andere Pflasterbauweisen. Die hier angegebenen Werte beziehen sich auf Fugenweiten ≤ 5 mm und Fugenanteile in der Größenordnung von 0,5%-2,5%. Aufgrund der geringen Fugenweiten und des i.d.R. sandigen Füllmaterials der Fugen variiert das Infiltrationsvermögen im

Gebrauchszustand auch bei unterschiedlichen Fugenanteilen nur in geringem Maße und liegt auf insgesamt eher geringem Niveau.

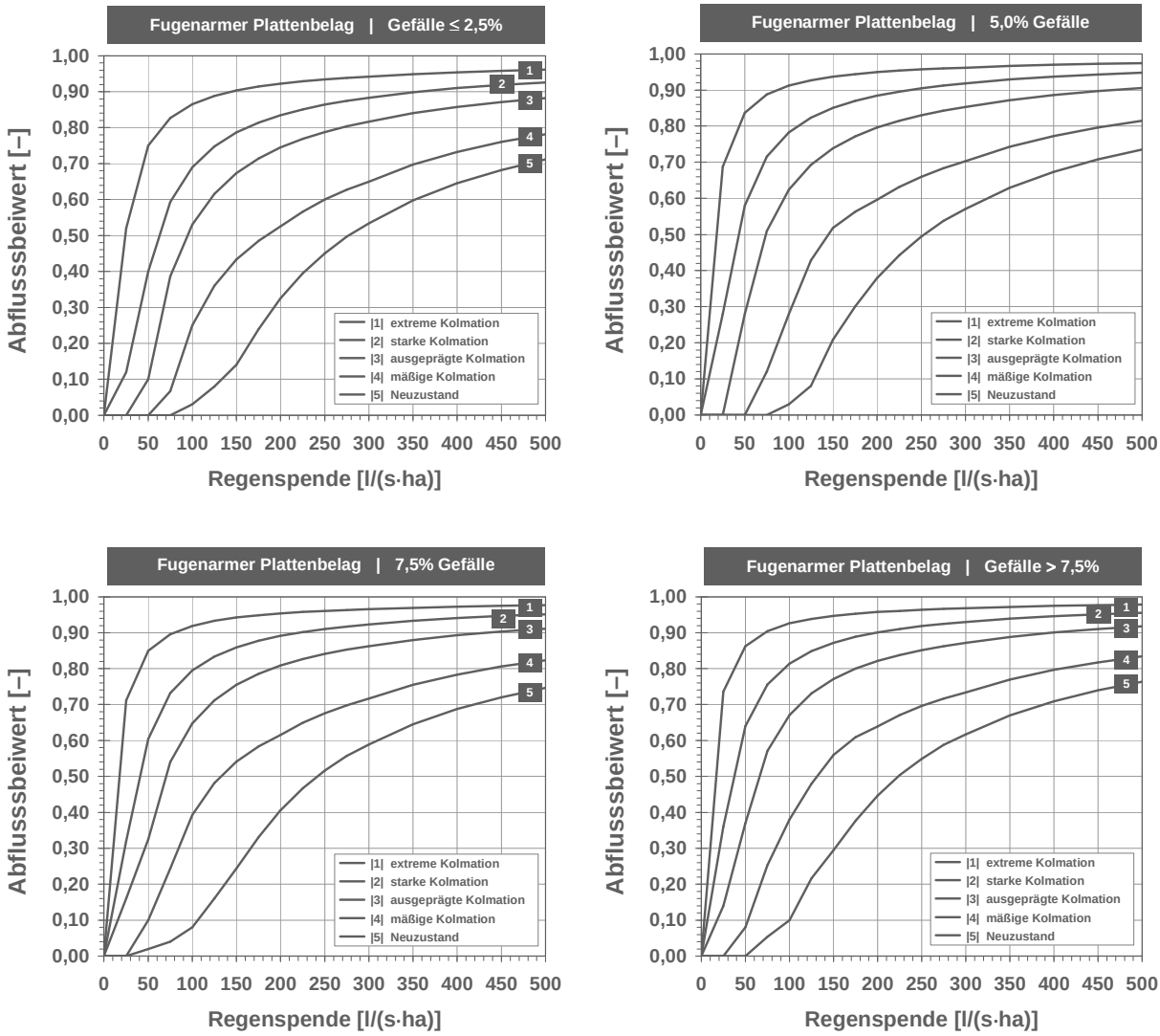


Abbildung 19: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenarm verlegte Plattenbeläge (Fugenanteil ≤ 3%)

Die empfohlenen Abflussbeiwerte für herkömmliches, fugenarm verlegtes Pflaster aus gefügedichten Natur- oder Betonsteinen sind in Abbildung 20 dargestellt. Hierunter fallen alle Pflasterbauweisen aus gängigen Rechteck- und Verbundsteinen, die Fugenweiten ≤ 5 mm aufweisen und deren Fugen mit sandigen Aggregaten verfüllt sind. Bei Pflasterbauweisen mit splittverfüllten Fugen ist dagegen ein deutlich höheres Versickerungsvermögen zu erwarten. Sie fallen daher nicht unter diese Gruppe.

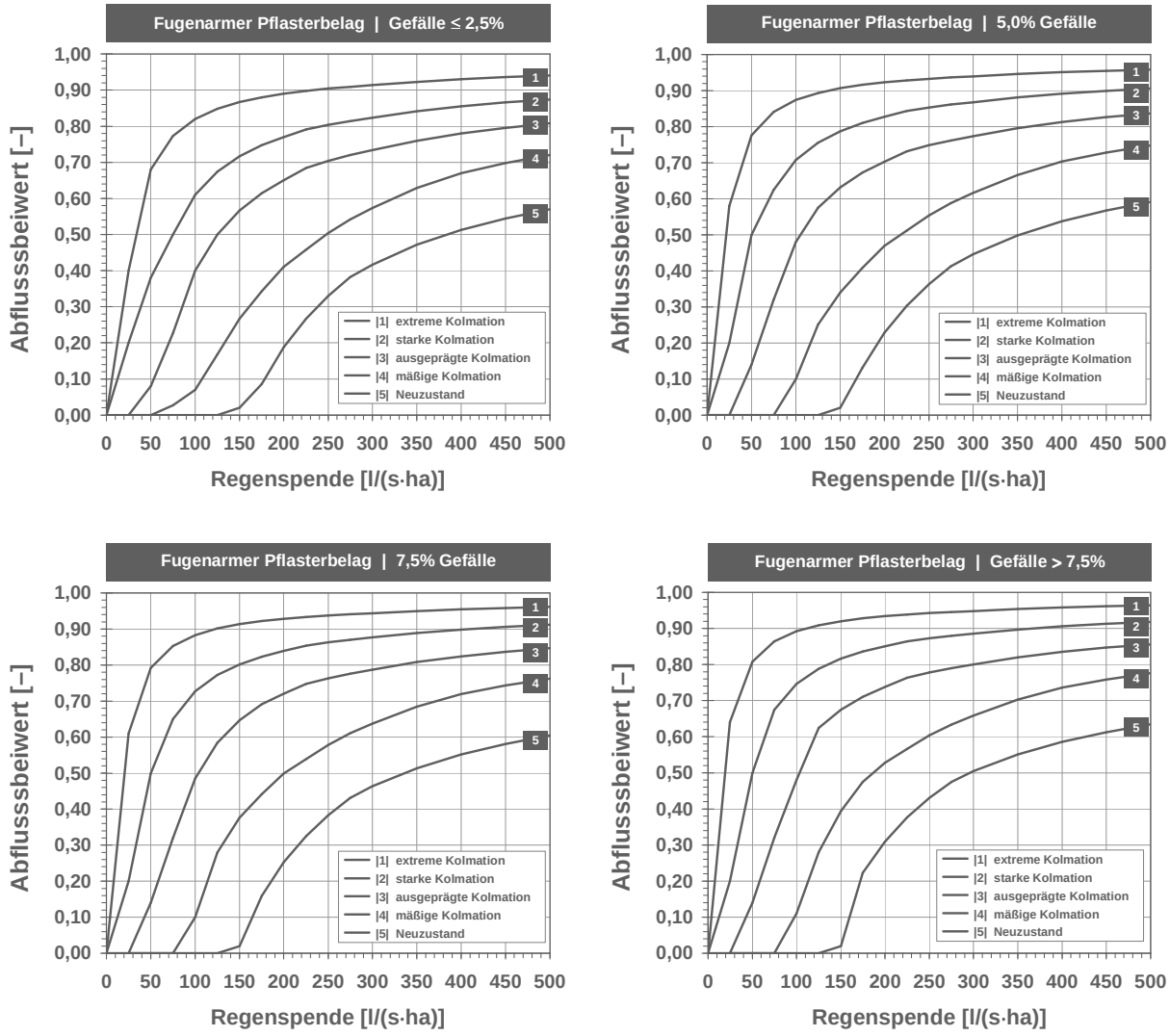


Abbildung 20: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenarm verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 3%-6%)

Für Pflasterbeläge, die deutlich weitere Fugen und entsprechend höhere Fugenanteile von 5-10% aufweisen, sind deutlich niedrigere Abflussbeiwerte zu erwarten. Hier kann das Infiltrationsvermögen so groß sein, dass auch bei bemessungsrelevanten Starkregenbelastungen kein Oberflächenabfluss auftritt. Mit zunehmendem Feinpartikeleintrag in die mit Sand verfüllten Fugen, kann sich das Versickerungsvermögen jedoch stark reduzieren. Dies spiegelt sich, wie in Abbildung 21 dargestellt, in entsprechend hohen Abflussbeiwerten für diesen Gebrauchszustand wider. Abflussbeiwerte > 0,70 sind dagegen nur in Ausnahmefällen und bei Niederschlagsbelastungen ≥ 300 l/(s·ha) zu erwarten.

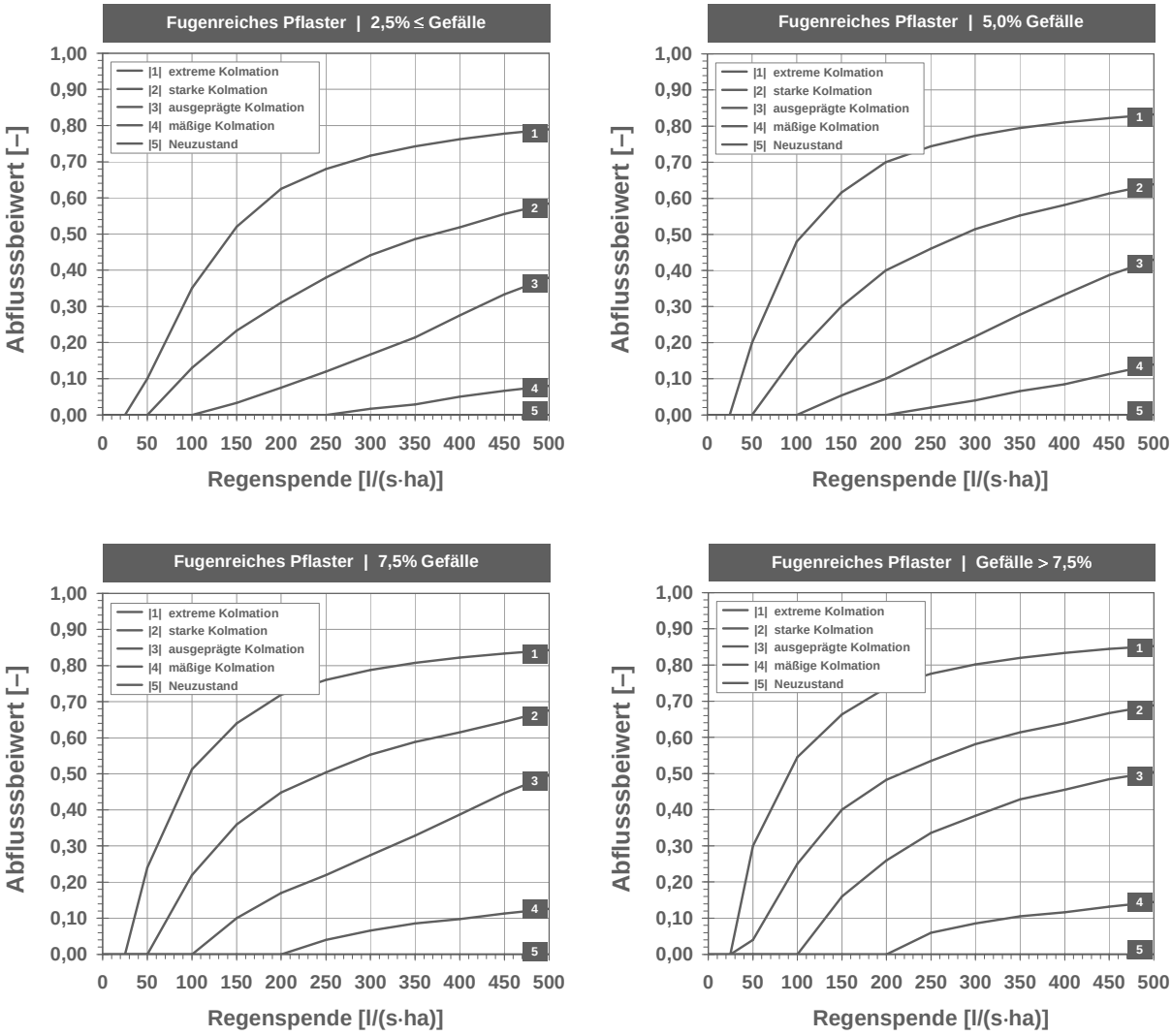


Abbildung 21: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenreich verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 6%-12%)

Bei Pflasterbelägen mit splittgefüllten Fugen oder Kammern ist dagegen selbst bei sehr ausgeprägtem Eintrag von Feinpartikeln in die Fugen dauerhaft mit einer vergleichsweise hohen Infiltrationskapazität zu rechnen. Zudem ist bei diesem Pflastertyp von einem deutlich geringeren Einfluss des Oberflächengefälles auf die Versickerungsleistung auszugehen. Entsprechend liegen die in Abbildung 22 ausgewiesenen Zahlenwerte auf deutlich niedrigerem Niveau. Dabei wird bspw. angenommen, dass eine Infiltrationsrate von über 100 l/(s·ha) immer anzutreffen ist.

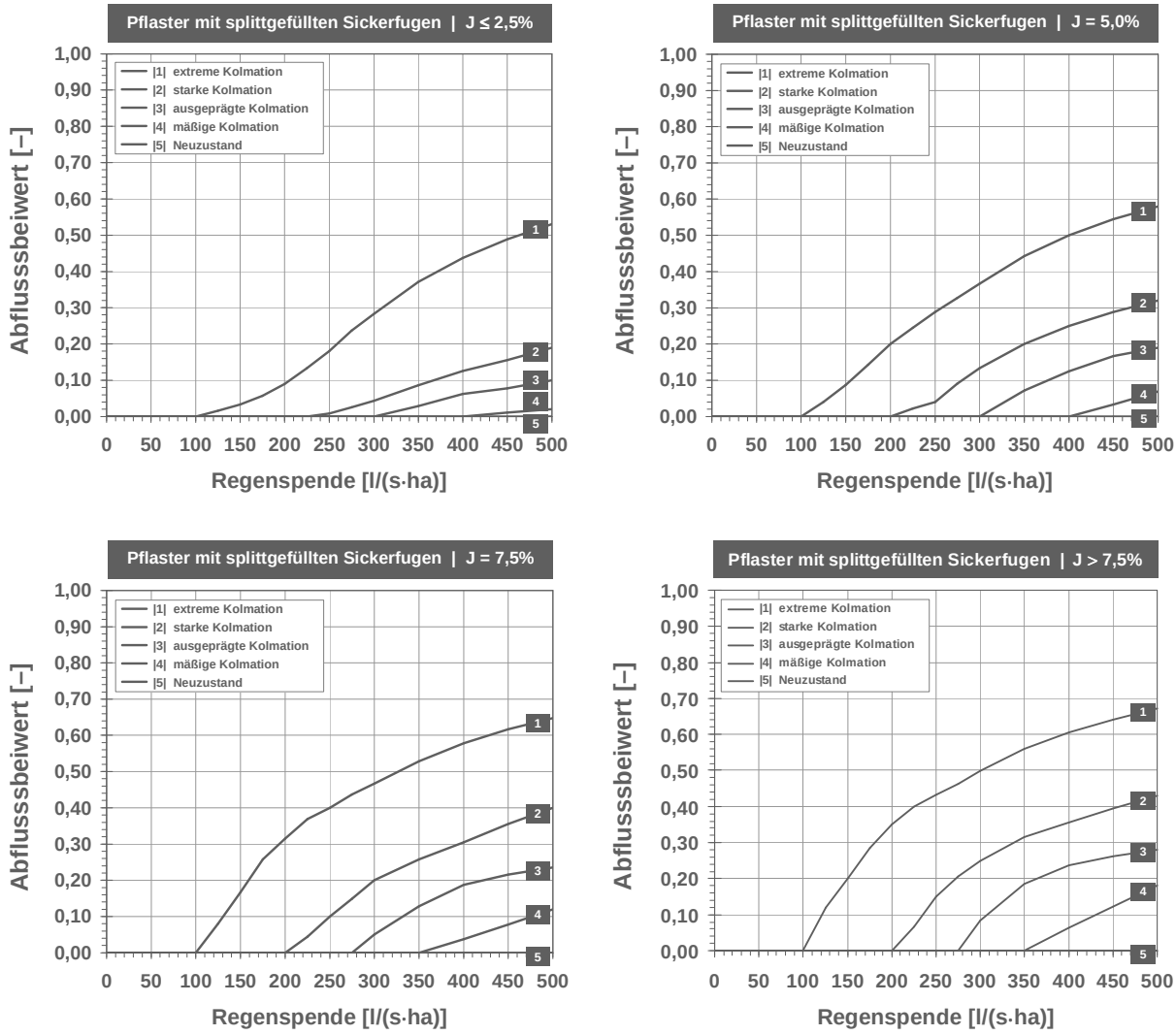


Abbildung 22: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für Pflasterbeläge mit splittgefüllten Fugen oder Kammern (Fugenanteil 6%-12%)

Das Versickerungsvermögen von porösen Pflasterbelägen aus Porenbetonsteinen liegt bei geringer Kolmation in der gleichen Größenordnung wie bei den Sickerfugenbelägen. Allerdings scheint die Oberfläche der Porenbetonsteine anfälliger gegen eine Verstopfung durch eingetragene Feinpartikel zu sein als bspw. eine Fugenfüllung aus Splitt. Entsprechend können bei diesem Belagstyp durchaus örtlich erheblich reduzierte Infiltrationsleistungen angetroffen werden. Bei hohem Kolmationsgrad schlägt sich ein großes Oberflächengefälle zudem deutlicher auf das Versickerungsvermögen nieder. Diesem Sachverhalt ist bei den in Abbildung 23 dargestellten Abflussbeiwerten Rechnung getragen.

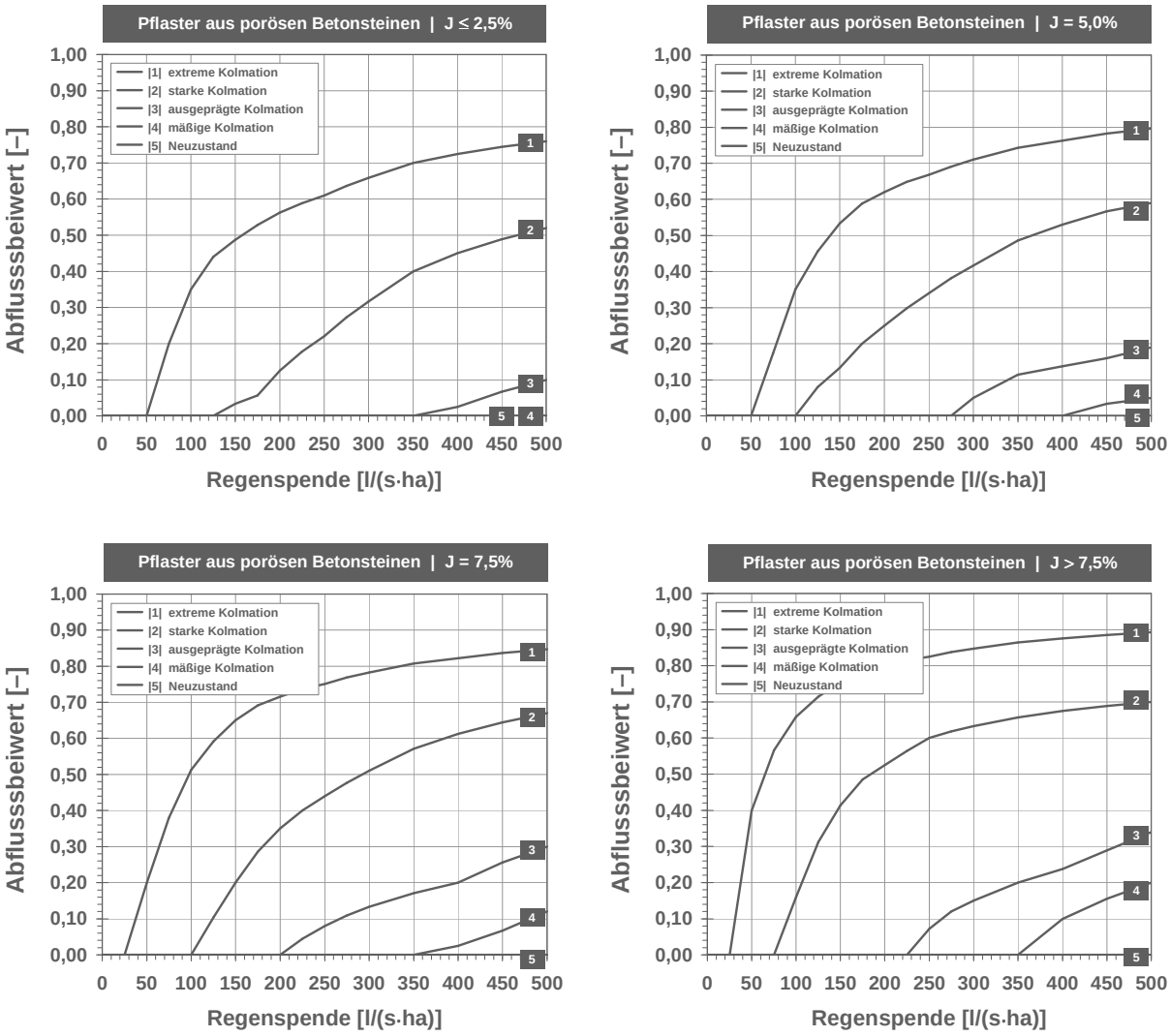


Abbildung 23: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für poröse Pflasterbeläge aus hauf-werksporigen Betonsteinen

Über die Versickerungskapazitäten von Flächenbefestigungen aus Rasengitterbelägen und Schotterrasen sind keine umfangreichen Untersuchungen bekannt. Sie waren auch nicht Bestandteil des Untersuchungsprogramms im Rahmen dieses Forschungsprojektes. In der Fachliteratur finden sich lediglich einige wenige Kennwerte zum Versickerungsvermögen diese Flächentypen[24], die jedoch in einem erheblichen Wertebereich schwanken.

Um dennoch eine Größenordnung für den Abflussbeiwert ausweisen zu können, wurden für die genannten Infiltrationsraten die zugehörigen Abflussbeiwerte ermittelt. Dabei wurde kein Anstieg der Versickerungsleistung bei steigender

[24] u.a. Kolb et al. (1998), Kolb et al. (2000) und Nolting et al. (2005)

Regenintensität berücksichtigt, da hierfür die vorhandenen Datenlage nicht ausreicht. Die in Abbildung 24 dargestellten Abflussbeiwerte stellen daher nur eine grobe Abschätzung dar. Dennoch verdeutlichen sie, dass insbesondere bei Rasengitter- und Rasenpflasterbelägen kaum mit einem Abflussbeitrag zu rechnen ist. Schotterrasen wird dagegen ein etwas geringeres Versickerungsvermögen zugewiesen. Hier sind durchaus nennenswerte Oberflächenabflüsse zu erwarten.

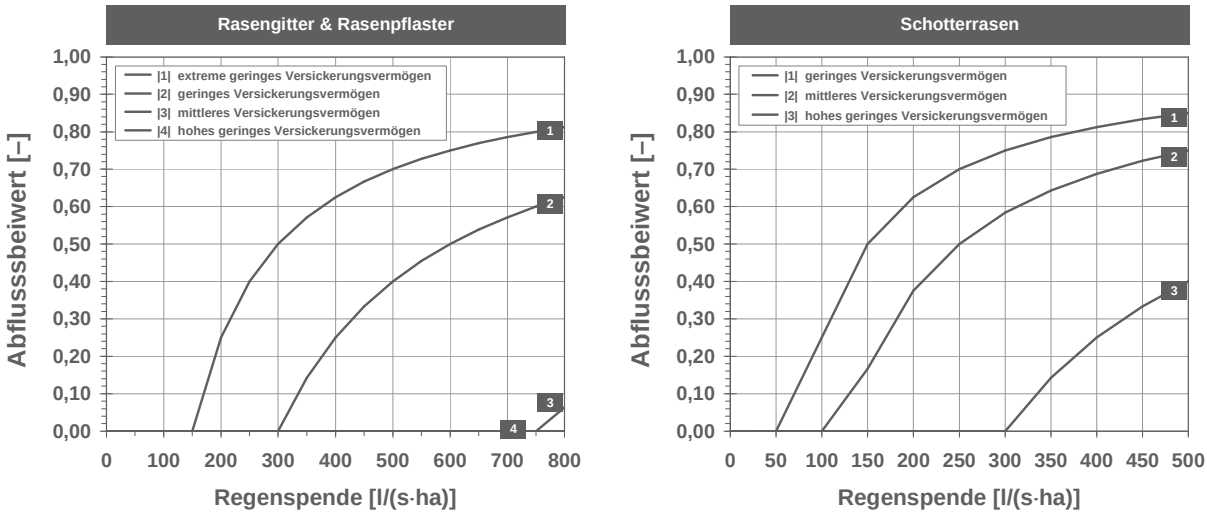


Abbildung 24: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für Flächenbefestigungen aus Rasengitter und Schotterrasen

Für andere als die hier genannten Flächenbefestigungen wie flächig vergossene Beläge aus Dränbeton oder Dränasphalt, verdichtete Kiesschüttungen und wassergebundene Decken liegen ebenfalls keine ausreichenden Daten zum Versickerungsvermögen vor. Sie entziehen sich daher einer weitergehenden Bewertung. Sie müssen an dieser Stelle unberücksichtigt bleiben. Nichtsdestotrotz decken die vorstehenden Empfehlungen ein großes Spektrum an Belagstypen ab.

5.2 Parameterwerte im Berechnungsansatz nach Horton

Der Berechnungsansatz nach Horton wird trotz seiner Defizite in Bezug auf versickerungsfähig ausgebildete Flächenbefestigungen auch bis auf Weiteres die dominierende Berechnungsmethode zur Ermittlung des Oberflächenabflusses im Zuge von Niederschlags-Abfluss-Simulationen bleiben. Aus diesem Grund werden nachfolgend Empfehlungen zu geeigneten Parameterwerten ausgesprochen, die analog zu den Abflussbeiwerten in Kap. 5.1 aus den zusammen getragenen Ergebnissen sowie den gewonnen Erkenntnissen abgeleitet wurden. Empfehlun-

gen zu flächenspezifischen Anfangsverlusthöhen sind darüber hinaus Tabelle 11 aufgeführt.

Der Ansatz nach Horton verwendet vier Modellparameter: die Anfangsversickerungsrate f_0, die Endversickerungsrate f_e, den Abnahmekoeffizient k sowie den Regenerationskoeffizient k_D. Die Versickerungsrate wird dabei mit Hilfe der ersten drei Parameter über eine Exponentialfunktion beschrieben. Die Regeneration des Versickerungsvermögens während Trockenphasen wird durch eine Exponentialfunktion ähnlichen Typs ermittelt, bei welcher der Regenerationskoeffizient an die Stelle des Abnahmekoeffizienten im Exponenten tritt.

Die Anfangs- und die Endfiltrationsraten nach Horton können unmittelbar aus den bekannten Versickerungskapazitäten abgeleitet werden. Dabei stellt sich lediglich die Schwierigkeit, einen sinnvollen Wert für die Anfangsversickerungsrate festzulegen.

Der Ansatz von Horton kann darüber hinaus das mit der Niederschlagsintensität de facto variierende Versickerungsvermögen nicht wider spiegeln. Bei der Betrachtung unterschiedlicher Niederschlagsbelastungen sind folglich unterschiedliche Anfangsversickerungsrate anzusetzen. Während dies bei der Berechnung von Einzelereignissen generell möglich ist, muss im Rahmen von Kontinuumssimulationen jedoch ein fester Parametersatz gewählt werden. Dennoch werden nachfolgend flächenspezifische Parameterwerte in Abhängigkeit von der Niederschlagsbelastung ausgewiesen. Je nach Anforderung und Ziel der Planungsaufgabe muss dann entsprechend der dabei im Vordergrund stehenden Ereignischarakteristik ein geeigneter Parametersatz ausgewählt werden.

Die beiden nachstehenden Tabellen enthalten die empfohlenen Wertebereiche der Anfangsversickerungsrate, differenziert nach zwei verschiedenen Kolmationsgraden. Die je Flächentyp angegebenen Zahlenwerte erstrecken sich dabei mitunter über einen großen Wertebereich und spiegeln damit die hohe Variabilität im Versickerungsvermögen der betrachteten Befestigungsarten wieder. Tabelle 9 und Tabelle 10 enthalten die zugehörigen Wertebereiche der Endinfiltrationsrate.

Generell ist bei versickerungsfähig ausgebildeten Flächenbefestigungen, anders als bei natürlichen Böden, nicht mit einer ausgeprägten Abnahme der Infiltrationsrate während eines Regenereignisses zu rechnen. Die z.T. hohen Anfangsversickerungsraten zu Beginn resultieren in erster Linie aus der Auffüllung von Grobporen in den Mineralstoffgemischen in Fugenraum und Pflasterbettung. Diese Auffüllung erfolgt je nach Regenintensität sehr rasch und ist i.d.R. innerhalb von 5-15 Minuten abgeschlossen.

Tabelle 7: Empfohlener Wertebereich der Anfangsversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei deutlicher Kolmation

Flächentyp			Regenintensitätsspektrum [l/(s·ha)]			
			< 100	100-200	200-300	> 300
Befestigungsart	**Fugenanteil**	**Fugenmaterial**	**Flächenbefestigung mit deutlicher Kolmation**			
Plattenbelag, fugenarm	≤ 3%	Sand	20-40	25-50	30-60	35-65
Pflasterbelag, fugenarm	3%-6%	Sand	20-50	25-60	30-70	40-80
Pflasterbelag, fugenreich	6%-12%	Sand	40-80	45-90	50-100	55-110
Pflasterbelag mit Sickerfugen od. Kammern	3%-6%	Splitt	80-150	90-170	100-190	110-210
Pflasterbelag mit Sickerfugen od. Kammern	6%-12%	Splitt	100-200	120-220	140-240	160-260
Pflassterbelag aus Porenbeton	-|-	-|-	50-500	65-550	80-600	95-650
Rasengittersteine	-|-	-|-	150-350	160-360	170-370	180-380
Schotterrasen	-|-	-|-	50-150	60-160	70-170	80-180

Tabelle 8: Empfohlener Wertebereich der Anfangsversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei mäßiger Kolmation

Flächentyp			Regenintensitätsspektrum [l/(s·ha)]			
			< 100	100-200	200-300	> 300
Befestigungsart	**Fugenanteil**	**Fugenmaterial**	**Flächenbefestigung mit mäßiger Kolmation**			
Plattenbelag, fugenarm	≤ 3%	Sand	40-90	50-100	60-110	65-115
Pflasterbelag, fugenarm	3%-6%	Sand	50-100	60-110	70-120	80-130
Pflasterbelag, fugenreich	6%-12%	Sand	80-160	90-200	100-220	110-230
Pflasterbelag mit Sickerfugen od. Kammern	3%-6%	Splitt	150-500	170-520	190-540	210-560
Pflasterbelag mit Sickerfugen od. Kammern	6%-12%	Splitt	200-700	220-725	240-750	260-800
Pflassterbelag aus Porenbeton	-|-	-|-	500-1000	550-1100	600-1200	650-1300
Rasengittersteine	-|-	-|-	350-1000	360-1050	370-1100	380-1100
Schotterrasen	-|-	-|-	150-500	160-550	170-600	180-650

Tabelle 9: Empfohlener Wertebereich der Endversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei deutlicher Kolmation

Flächentyp			Regenintensitätsspektrum [l/(s·ha)]			
			< 100	100-200	200-300	> 300
Befestigungsart	**Fugenanteil**	**Fugenmaterial**	**Flächenbefestigung mit deutlicher Kolmation**			
Plattenbelag, fugenarm	≤ 3%	Sand	15-30	20-35	25-40	30-45
Pflasterbelag, fugenarm	3%-6%	Sand	15-40	20-50	25-60	30-70
Pflasterbelag, fugenreich	6%-12%	Sand	25-65	35-75	40-85	45-95
Pflasterbelag mit Sickerfugen od. Kammern	3%-6%	Splitt	50-120	60-135	70-150	80-165
Pflasterbelag mit Sickerfugen od. Kammern	6%-12%	Splitt	65-190	85-210	105-230	115-250
Pflassterbelag aus Porenbeton	-|-	-|-	40-475	55-525	70-575	85-625
Rasengittersteine	-|-	-|-	100-350	110-360	120-370	130-380
Schotterrasen	-|-	-|-	40-150	50-160	60-170	70-180

Tabelle 10: Empfohlener Wertebereich der Endversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei mäßiger Kolmation

Flächentyp			Regenintensitätsspektrum [l/(s·ha)]			
			< 100	100-200	200-300	> 300
Befestigungsart	**Fugenanteil**	**Fugenmaterial**	**Flächenbefestigung mit mäßiger Kolmation**			
Plattenbelag, fugenarm	≤ 3%	Sand	25-70	30-75	35-80	40-85
Pflasterbelag, fugenarm	3%-6%	Sand	30-80	40-90	50-100	60-110
Pflasterbelag, fugenreich	6%-12%	Sand	50-120	60-130	70-140	80-150
Pflasterbelag mit Sickerfugen od. Kammern	3%-6%	Splitt	100-450	120-470	140-490	150-500
Pflasterbelag mit Sickerfugen od. Kammern	6%-12%	Splitt	150-600	170-650	190-700	210-750
Pflassterbelag aus Porenbeton	-|-	-|-	400-1000	450-1100	500-1200	550-1300
Rasengittersteine	-|-	-|-	250-1000	260-1050	270-1100	280-1100
Schotterrasen	-|-	-|-	120-500	140-550	160-600	170-650

Tabelle 11: Anfangsverlusthöhen durchlässig befestigter Flächentypen

Flächentyp			Anfangsverlusthöhe [mm]	
Befestigungsart	**Fugenanteil**	**Fugenmaterial**	**Literatur**	**Empfehlung**
Plattenbelag, fugenarm	≤ 3%	Sand	2,0	2,5
Pflasterbelag, fugenarm	3%-6%	Sand	2,0	2,5
Pflasterbelag, fugenreich	6%-12%	Sand	3,0	3,0
Pflasterbelag mit Sickerfugen od. Kammern	3%-6%	Splitt	4,5	5,0
Pflasterbelag mit Sickerfugen od. Kammern	6%-12%	Splitt	4,5	6,0
Pflassterbelag aus Porenbeton	-|-	-|-	-|-	3,5
Rasengittersteine	-|-	-|-	6,0	6,5
Schotterrasen	-|-	-|-	4,0	4,5

Im Ansatz nach Horton wird dieser Rückgang in der Versickerungsrate über den Abnahmekoeffizient k beschrieben. Zur Anwendung auf wasserdurchlässige Flächenbefestigungen werden pauschal Zahlenwerte von 0,10-0,50 min^{-1} empfohlen.

Für den Parameter k_D zur Beschreibung der Regenration des Versickerungsvermögens in niederschlagsfreien Perioden werden in der Fachliteratur Werte im Bereich von 0,0001-0,001 min^{-1} genannt. Bei wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen ist jedoch davon auszugehen ist, dass sich die Grobporen in der Deckschicht vergleichsweise rasch nach Ende eines Regenereignisses wieder entleeren und sich somit das Anfangspotenzial entsprechend schnell regenerieren kann. Für den Regenerationskoeffizienten wird daher ein Wertebereich von 0,0005-0,002 min^{-1} empfohlen. Dadurch wird sichergestellt, dass rechnerisch nach einer Trockenperiode von 24 Stunden die Anfangsversickerungsrate zu rd. 50%-90% wieder erreicht wird; nach 36 Stunden rd. 75%-100%. Diese Größenordnung findet sich auch in den bislang dokumentierten Messwerten. Geringere Zahlenwerte führen dagegen dazu, dass sich das Anfangspotenzial erst nach mehreren Tagen wieder aufbauen würde.

Die hier zur Anwendung im Modellansatz nach Horton empfohlenen Parameterwerte – insbesondere die Zahlenwerte der Anfangs- und der Endversickerungsrate – weichen z.T. deutlich von den bisherigen Anwendungsempfehlungen ab.[25]

[25] z.B. Schmitt, T.G. (2000); Schmitt, T.G. et al. (2001) und DWA (2007)

Die Versickerungskapazität durchlässig befestigter Siedlungsflächen muss jedoch angesichts der inzwischen verfügbaren Ergebnisse und Erkenntnisse höher bewertet werden als bislang. Die bisherigen Empfehlungen mussten sich dagegen noch auf eine weitaus begrenztere Datenbasis stützen. Sie orientierten sich in erster Linie an den im technischen Regelwerk verankerten Abflussbeiwerten, die in bezug auf versickerungsfähige Flächenbefestigungen seit langem vielfach als zu hoch kritisiert werden.[26]

Die im Rahmen diese Forschungsprojektes erarbeiteten Empfehlungen zu den Abflussbeiwerten sowie den Modellparametern im Ansatz nach Horton vermögen dagegen das Versickerungshalten durchlässiger Flächenbeläge weitaus besser wider zu spiegeln.

[26] z.B. Borgwardt, S. (1994b); Hanses et al. (1999) und Timmermann, U. (1999)

6 Zusammenfassung und Fazit

Planer von Entwässerungssystemen werden zukünftig gefordert sein, das Abfluss- und Versickerungsverhalten unbefestigter und durchlässiger befestigter Flächen innerhalb von Siedlungsgebieten stärker als bisher zu berücksichtigen – sei es bei der Planung und Dimensionierung dezentraler oder semi-zentraler Anlagen zur Regenwasserbewirtschaftung oder bei der Untersuchung der Überflutungssicherheit städtischer Kanalnetze. Hierzu ist es jedoch erforderlich, den bisherigen Kenntnisstand hinsichtlich des physikalischen Abfluss- und Versickerungsprozesse zu verbessern und geeignetere Methoden zu deren rechnerischer Nachbildung zu entwickeln. Das vorliegende Forschungsprojekt versucht hierzu einen Beitrag zu leisten.

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde der bisherige Kenntnisstand zum Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger Flächenbeläge zusammengetragen. Die Synthese der in der Fachliteratur dokumentierten Erkenntnisse ist im ungekürzten Abschlussbericht ausführlich dargestellt und erörtert; hier jedoch nur knapp zusammengefasst (Kap. 2.2). Den Kern der Untersuchung bildet ein eigenes Messprogramm, das sowohl Feldmessungen an Bestandsflächen als auch Beregnungsversuche an einer Lysimeteranlage unter Laborbedingungen umfasste.

Anhand von 21 durchgeführten Infiltrometermessungen wurden Kenntnisse zum Versickerungsvermögen verschiedener Belagstypen im Gebrauchszustand gesammelt. Die Ergebnisse repräsentieren den nutzungsbedingten Rückgang der Versickerungsleistung durch den Eintrag von Feinpartikeln in die Fugen (Kolmation) oder die sukzessive Nachverdichtung des Oberbaus (Kap. 4.1). Zusammen mit den in der Fachliteratur dokumentierten Kennwerten stellten die Messergebnisse darüber hinaus wichtige Referenzwerte dar, um verschiedene Kolmationsgrade nachfolgend auch im Rahmen von Laborversuchen adäquat nachbilden zu können.

In rd. 140 Beregnungsversuchen wurden zahlreiche Belagstypen für verschiedene Beregnungslastfälle und unter diversen Randbedingungen analysiert. Die Laborversuche dienten in erster Linie dazu, den Einfluss wesentlicher Randbedingungen wie Regenintensität, Oberflächengefälle und Kolmationsgrad auf das Versickerungsverhalten systematisch zu untersuchen und zu quantifizieren. Die Lysimeterversuche umfassten dabei z.T. baugleiche Flächenbeläge wie die Feldmessungen, um einen direkten Vergleich zwischen dem Versickerungsverhalten unter realen Nutzungsbedingungen und dessen Nachbildung im Labor zu ermög-

lichen. Der Versuchsaufbau und die messtechnische Ausstattung sowie die gewählte Vorgehensweise der Nachbildung von Kolmationserscheinungen mit Hilfe von Quarzmehl sowie der Variation jeweils einer Randbedingung im Untersuchungszyklus haben sich insgesamt sehr bewährt. So liefern die Lysimeterversuche umfangreiche, belastbare und aussagekräftige Messergebnisse. Durch die Verknüpfung mit Feldmessungen im Bestand war es überdies möglich, den Vorteil von Laboruntersuchungen mit klar definierten und reproduzierbaren Versuchsbedingungen mit dem Abfluss- und Versickerungsverhalten von Flächenbefestigungen unter realen Nutzungsbedingungen und nach mehrjähriger Standzeit zu verknüpfen (Kap. 3 und Kap. 4.2).

Auf der Basis der gewonnen Daten konnte das Versickerungsphänomen auf wasserdurchlässigen Flächenbefestigung allgemein charakterisiert und das Infiltrationsvermögen bei unterschiedlichen äußeren und baulichen Randbedingungen quantifiziert werden. Wesentliche das Versickerungsphänomen bestimmende Faktoren und Zusammenhänge konnten dabei identifiziert werden (Kap. 4.2 und Kap. 4.3).

Darüber hinaus wurden die Ergebnisse dazu genutzt, einen weitergehenden Modellansatz zur Abflussbildung zu konzipieren (Kap. 4.4). Der entwickelte Ansatz beschreibt das Abfluss- und Versickerungsphänomen mit Hilfe eines empirisch-deterministischen Schichtenmodells, das sowohl die niederschlagsabhängige Infiltrationsleistung als auch die Speicherwirkung der Tragschicht berücksichtigt. Die prinzipielle Anwendbarkeit des Modells wurde im Rahmen des Projektes für zwei besonders intensiv untersuchte Belagstypen nachgewiesen. Eine Anwendung auf das gesamte Spektrum versickerungsfähig ausgebildeter Flächenbefestigung erfordert hingegen eine weiter verbesserte Datenlage zum Versickerungsverhalten dieser Belagstypen.

Indessen wurden aus den gewonnen Erkenntnissen substanzielle Empfehlungen für die stadthydrologische Praxis abgeleitet (Kap. 5). Die Anwendungsempfehlungen umfassen hierbei insbesondere Abflussbeiwerte zur konventionellen Erfassung des Abflussbeitrages von Siedlungsflächen sowie Parameterwerte zur Anwendung des Berechnungsansatzes nach Horton. Dieser Ansatz stellt die dominierende Berechnungsmethode zur Ermittlung des Oberflächenabflusses von durchlässig befestigten Flächen im Zuge von Niederschlags-Abfluss-Simulationen dar. Bislang lagen nur unzureichende Parameterempfehlungen vor, die sich nicht mit den in der Fachliteratur dokumentierten Erkenntnissen zum Versickerungsverhalten durchlässiger Flächenbefestigungen deckten. Dementsprechend weichen die nun auf der Grundlage der umfangreichen Datenbasis ausgewiesenen Parameterwerte deutliche Unterschiede zu den bisherigen Anwendungsempfehlungen auf.

Im Rahmen der hier dokumentierten Forschungsarbeit konnte eine Vielzahl gewinnbringender Erkenntnisse zur Charakterisierung und Quantifizierung des

Versickerungsphänomens auf wasserdurchlässigen Flächenbeläge gewonnen werden. Darüber hinaus wurde ein erster Schritt zu einer verbesserten Modellierung ihres Abflussverhaltens getätigt. Es wurde jedoch ebenfalls dargelegt, dass insbesondere bezüglich der kleinräumigen physikalischen Prozesse bei der Versickerung noch vielfältige Kenntnisdefizite herrschen. Diese gilt es zukünftig weiter zu minimieren.

7 Literatur

Akan, A.O. (2003): Urban Stormwater Hydrology – A Guide to Engineering Calculations, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, USA.

ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2000): Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser, ATV-DVWK-Regelwerk, Merkblatt ATV-DVWK-M 153, GFA, Hennef.

ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2001): Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen, ATV-DVWK-Regelwerk, Merkblatt ATV-DVWK-M 177, GFA, Hennef.

ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2003): Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen, ATV-DVWK-Regelwerk, Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198, GFA, Hennef.

ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2004): Anforderungen an Niederschlag-Abfluss-Berechnungen in der Stadtentwässerung, ATV-DVWK-Regelwerk, Merkblatt ATV-DVWK-M 165, GFA, Hennef.

Bean, E. (2005): A field study to evaluate permeable pavement surface infiltration rates, runoff quantity, runoff quality and exfiltrate quality; Master Thesis, North Carolina State University, http://www.lib.ncsu.edu.

Binnewies, W. und Schütz, M. (1985): Gutachten über das Versickerungsverhalten Hamburger Gehwegbefestigungen; im Auftrag der Baubehörde der Freien Hansestadt Hamburg (unveröffentlicht).

Borgwardt, S. (1994a): Bewertung wassergebundener Befestigungen, Naturschutz und Landschaftsplanung 3/94; S. 98-101.

Borgwardt, S. (1994b): Der Abflussbeiwert – Kritische Anmerkungen zur DIN 1986 Teil 2, Das Gartenamt 11/94; S. 756-760.

Borgwardt, S. (1995): Die Versickerung auf Pflasterflächen als Methode der Entwässerung von minderbelasteten Verkehrsflächen, Band 41 der Schriftenreihe „Beiträge zur räumlichen Planung„ des Fachbereiches Landschaftsarchitektur und Umweltentwicklung der Universität Hannover.

Bosseler, B.; Homann, D.; Harting, K. (2004): Prüfanlage für wasserdurchlässige Flächenbeläge - Vergleichsprüfungen im Rahmen des Probebetriebes, Forschungsbericht (unveröffentlicht), IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen.

Davies, J. W.; Pratt, C. J.; Scott, M. A. (2002): Laboratory study of permeable pavement systems to support hydraulic modelling; Proc. 9th Int. Conf. on Urban Drainage, ICUD, Sept. 8-13, 2002, Portland, Oregon, USA.

Dellwig, M. (1988): Untersuchungen an wasserdurchlässigen Belägen für Fahrflächen – Teil 1, Neue Landschaft, 33 (2000), S. 457-461.

Dierkes, C. (1999): Verhalten von Schwermetallen im Regenabfluss von Verkehrsflächen bei der Versickerung über poröse Deckbeläge, Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft, Universität Essen, Heft 14.

DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2005): Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser, DWA-Regelwerk, Arbeitsblatt DWA-A 138, GFA, Hennef.

DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2006): Bemessung von Regenrückhalteräumen, ATV-DVWK-Regelwerk, Arbeitsblatt DWA-A 117, GFA, Hennef.

DWA (2007): Oberflächenabfluss von durchlässig befestigten Flächen, Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe ES-2.6 „Abfluss- und Schmutzfrachtsimulation", KA Abwasser Abfall, 54. Jhrg., Nr. 8, S. 784-788.

Fach, S. (2006): Retentionswirkung und Stoffrückhalt von ausgewählten wasserdurchlässig befestigten Verkehrsflächen, Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft, Universität Essen, Heft 28.

Flöter, O. (2006): Wasserhaushalt gepflasterter Straßen und Gehwege, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 58.

James, W.; James, R.C. (1998): Users guide to SWMM4 RUNOFF and supporting modules - Hydrology, Computational Hydraulics International, Guelph, Ontario.

Jonasson S. A. (1984) Determination of Infiltration Capacity and Hydraulic Conductivity; 3rd International Conference on Urban Storm Drainage, Göteborg, Sweden.

Hanses, U. et al (1999): Wasserdurchlässiges Pflaster auf gering durchlässigem Untergrund, TIS 4/99; S.61-69.

IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur (2005): DIBt-Zulassungsverfahren für Wasserdurchlässige Flächenbeläge – IKT nimmt Prüfungen auf, IKT-eNewsletter Februar 2005, URL: http://www.ikt.de.

Kellermann, C. (2003): Zur Bewertung des Infiltrationsverhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel, Schriftenreihe des Inst. für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr- Universität Bochum.

Kolb, W. und Frank, R. (1998): Schotterrasen – Empfehlungen für die Praxis, Neue Landschaft, 6/1998, S. 435-443.

Kolb, W. und Leopoldseder, T. (2000): Rasenfugenpflaster: Stoffe – Infiltrationsraten und Sickerwasserqualität – Vegetation und Pflege, Stadt und Grün, 9/2000, S. 610-615.

Kretzer, H. und Ruiz-Rodriguez, E. (1992): Tropfinfiltrometer für befestigte und unbefestigte Flächen, Wasser und Boden, 44 (1992), S. 805 - 807.

Maidment, D. R. (1993): Handbook of Hydrology; McGraw-Hill Professional.

Maniak, U. (1993): Hydrologie und Wasserwirtschaft – Einführung für Ingenieure, 3. Auflage, Springer-Verlag.

Nolting B., Schönberger O., Harting K. and Gabryl P. (2005): Prüfung wasserdurchlässiger Flächenbeläge nach mehrjähriger Nutzung; Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt im Auftrag des MUNLV NRW; unveröffentlicht (Zusammenfassung siehe: http://www.fh-bochum.de).

Pecher, R. (1969): Der Abflussbeiwert und seine Abhängigkeit von der Regendauer, Berichte aus dem Institut für Wasserwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Band 2, Technische Hochschule München.

Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde, 12. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

Schmitt, T.G. (2000): Überprüfung der Standard-Abflussbeiwerte durch Anwendung eines Abflussmodells zur Kanalnetz- und Schmutzfrachtberechnung, Untersuchung im Auftrag der ATV-DVWK, unveröffentlicht.

Schmitt, T.G. und Illgen, M. (2001): Abflussbeiwerte für die Bemessung und Abflusssimulation von Entwässerungsanlagen, KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, 48. Jg., Dezember 2001, S. 1720-1728.

Schramm, M. und Münchow, B. (1995): Beregnungsversuche zur Ermittlung der Infiltrations- und Abflusscharakteristik neuer und gealterter Flächenbefestigungen, in Entsiegelung und Oberflächenwasserversickerung mit durchlässigen Platten- und Pflasterbelägen, FLL Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (Hrsg.), S. 79-96.

SLG (2004): Marktdatenerhebung der Fachvereinigung Betonprodukte für Straßen-, Landschafts- und Gartenbau e.V.. Bonn 2004.

Timmermann, U. (1998): Entsiegelungswirkung verschiedener Oberbauarten – Modellhaft an einem Parkplatz in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf, Abschlussbericht DBU-Forschungsvorhaben, Fachhochschule Osnabrück.

Timmermann, U. (2000): Entsiegelung von Verkehrsflächen, Teile 1-5, Neue Landschaft 5/2000, S. 311-314; 6/2000, S. 381-384; 7/2000, S. 445-448; 8/2000, S. 515-516; 9/2000, S. 671-674.

Ulonska, D. (2005): Planung und Ausführung dauerhafter Betonpflasterbauweisen, SLG, Bonn.

Verworn, H.-R. (1999): Die Anwendung von Kanalnetzmodellen in der Stadthydrologie, Schriftenreihe SuG - Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Heft 18, SuG-Verlagsgesellschaft.

Zimmer, U. (1999): Numerische Beschreibung und Bewertung von Anlagen zur Retention und Versickerung von Regenwasser, Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft, Universität Essen, Heft 13.