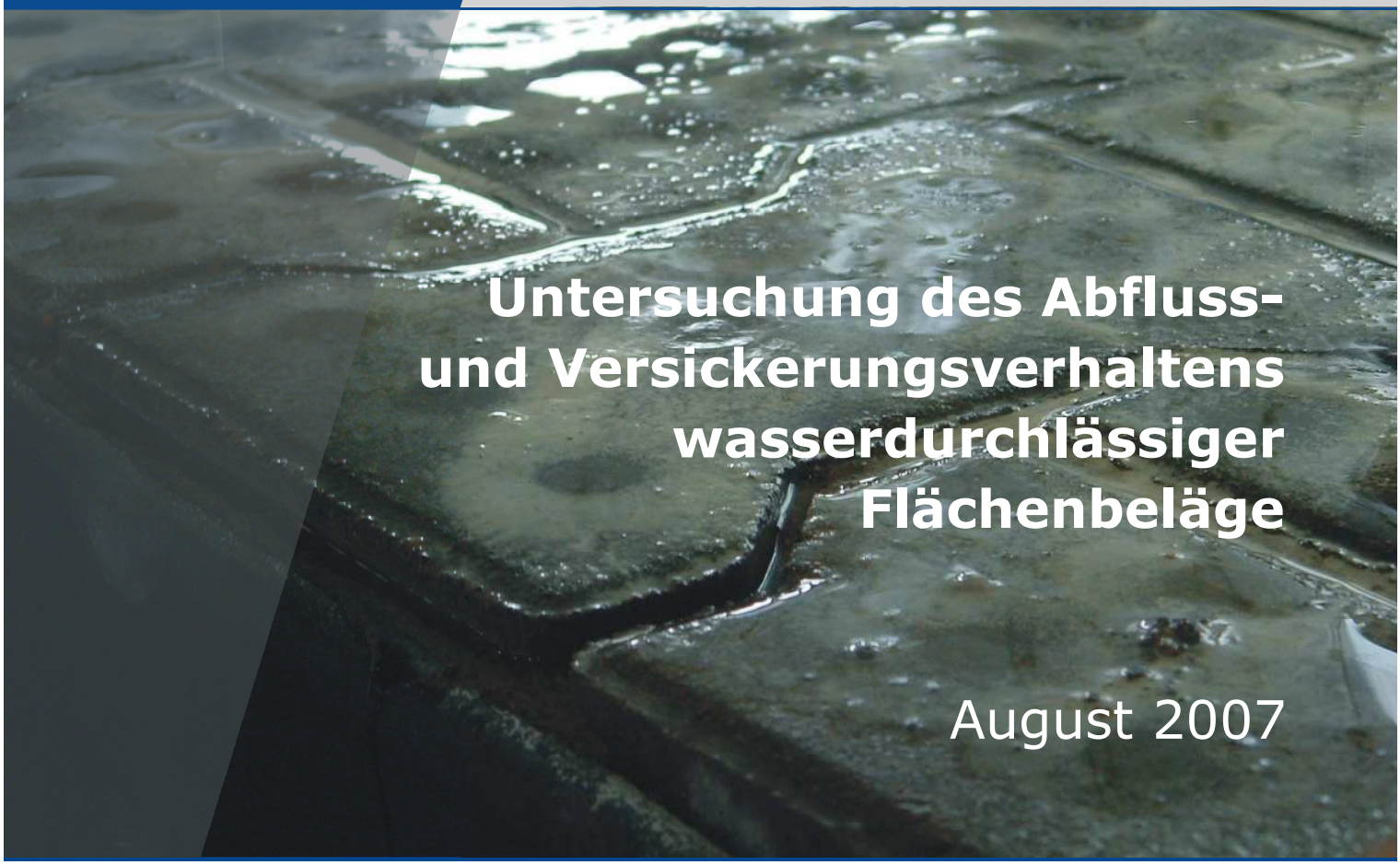
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN

Zusammenfassung



Untersuchung des Abfluss- und Versickerungsverhaltens wasserdurchlässiger Flächenbeläge

August 2007

Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Technische Universität Kaiserslautern

in Kooperation mit

IKT- Institut für Unterirdische Infrastruktur
Gelsenkirchen

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

Hintergrund und Zielsetzung

Planer von Entwässerungssystemen werden zukünftig gefordert sein, das Abfluss und Versickerungsverhalten unbefestigter und durchlässiger befestigter innerhalb von Siedlungsgebieten stärker als bisher zu berücksichtigen – sei es bei der Planung und Dimensionierung dezentraler oder semizentraler 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.

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 bestand 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.

Bisheriger Kenntnisstand

In einem ersten Arbeitsschritt wurde der bisherige Kenntnisstand zum Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger Flächenbeläge zusammengetragen. Die Synthese der in der Fachliteratur dokumentierten Messergebnisse und Erkenntnisse zeigte, dass für die Mehrzahl der Deutschland gängigen Flächenbefestigungen Kennwerte zum Versickerungsvermögen im Gebrauchszustand vorliegen – wenn auch in recht begrenztem Umfang.

In Tabelle 1 ist die Bandbreite der in den verschiedenen Untersuchungen festgestellten Versickerungsraten zusammengestellt. Die angegebenen Zahlenwerte dokumentieren den enormen Wertebereich, in dem das Infiltrationsvermögen generell variieren kann und sind daher nur als Orientierungsgrößen zu verstehen.

Tabelle 1: 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)

Messtechnische Untersuchungen

Den Kern der Untersuchung bildet ein eigenes Messprogramm, das sowohl Feldmessungen an Bestandsflächen als auch Beregnungsversuche an einer Lysimeteranlage unter Laborbedingungen umfasste.

Feldmessungen an Bestandsflächen

Anhand von 21 Infiltrometermessungen mit Hilfe eines Tropfinfiltrometers 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. 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.

Eine Übersicht der in situ untersuchten Pflasterbeläge sowie die wesentlichen Flächencharakteristika sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Übersicht der Untersuchungsflächen der Infiltrometermessungen[1]

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.

Die gemessenen Infiltrationsganglinien der Messpunkte zeigten i.d.R. den erwarteten Verlauf mit hohen aber relativ rasch sinkenden Infiltrationsraten zu Beginn der Versuche, wenn sich die Porenräume der grobkörnigen Mineralstoffe in den 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 stets auf deutlich höherem Niveau als bspw. die in der Radspur eines Stellplatzes gemessenen Versickerungsraten.

Aus den Ganglinienverläufen wurden charakteristische Infiltrationskennwerte extrahiert. Dabei wurde 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 1 sind exemplarisch die Anfangs- und Endinfiltrationsraten der vier am Standort Lingen untersuchten Pflasterbauweisen einan-

[1] Orte: Lingen/Ems (Niedersachsen); Gelsenkirchen, Straelen und Kevelaer (NRW)

der gegenüber gestellt. Die Grafik unterstreicht, dass selbst mäßig durchlässige Pflasterarten auch nach mehr als zehnjähriger Liegezeit ein durchaus erstaunlich hohes Versickerungsvermögen aufweisen können.

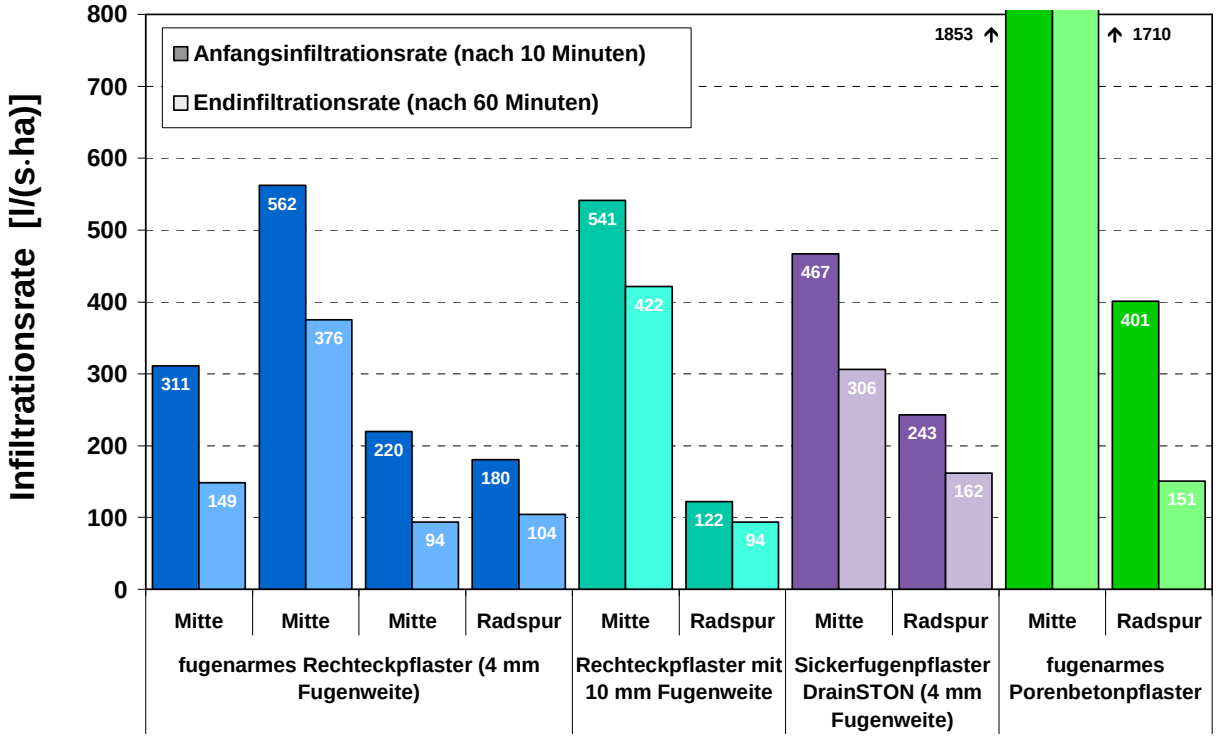


Abbildung 1: **Anfangs- und Endinfiltrationsraten der vier am Standort Lingen untersuchten Pflastertypen**

Der untersuchte Sickerfugenbelag in Gelsenkirchen wies ebenfalls ein sehr hohes Versickerungsvermögen auf. So ergaben sich bei den drei Versuchen Endinfiltrationsraten von rd. 400 l/(s·ha), 600 l/(s·ha) sowie von 900 l/(s·ha). Die Werte verdeutlichen, in welch großem Wertebereich das Infiltrationsvermögen einer Pflasterbauweise nach mehrjähriger Nutzung – auch kleinräumig – streuen kann.

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.[2] Die Infiltrationsraten an den untersuchten Messpunkten waren hier – mit einer Ausnahme – ebenfalls sehr hoch und wiesen 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

[2] 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

rote Asche[3] 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 2 zeigt die Gegenüberstellung der Messwerte an beiden Standorten.

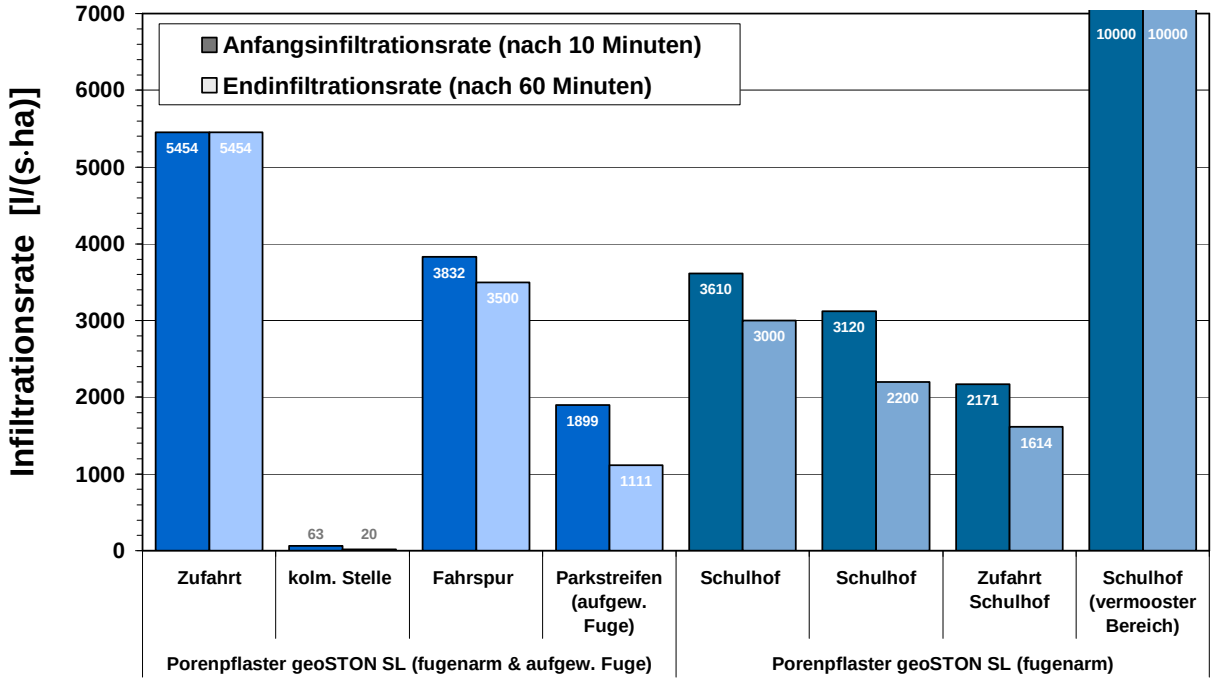


Abbildung 2: **Bandbreite der in Straelen und Kevelaer gemessenen Versickerungsraten an Pflasterbelägen aus haufwerksporigen Betonsteinen**

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 Fahrzeugverkehr 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

[3] eine exakte Spezifizierung dieses feinkörnigen, rotfarbigen Materials war nicht möglich

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.

Beregnungsversuche im Labor

Den Schwerpunkt des messtechnischen Untersuchungsprogramms bilden umfangreiche Beregnungsversuche an einer Lysimeteranlage am IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur (IKT).[4] 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 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.

Die Versuche 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 ermöglichen. Eine Kurzübersicht der durchgeführten Versuchsserien ist in Tabelle 3 zusammengestellt. Eine schematische Darstellung der Versuchsanlage zeigt Abbildung 3.

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

Tabelle 3: 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.

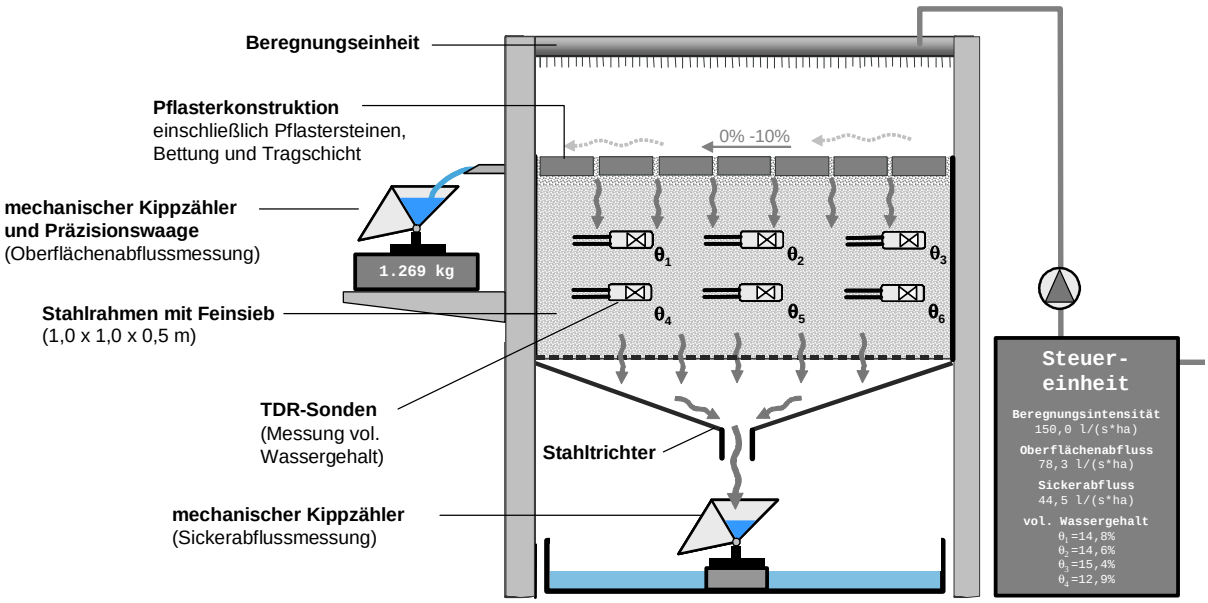


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Lysimeteranlage

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.

In Abbildung 4 sind die bei verschiedenen Beregnungsintensitäten resultierenden Versickerungsraten exemplarisch für die Versuchsserie an einem gering bis mäßig kolmatierten sowie einem deutlich kolmatierten Belag aus Doppelverbundpflaster jeweils bei einem Oberflächengefälle von 2,5% grafisch dargestellt. Die Nachbildung der beiden unterschiedlichen Kolmationsgrade erfolgte durch Einspülung von 200 g/m² bzw. 400 g/m² Quarzmehl in das Fugenmaterial.

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, zeigte 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 4 gegenüber gestellten Infiltrationsverläufe dokumentieren darüber hinaus, in

welchem Maße sich ein Feinpartikeleintrag in die Fugen auf das Versickerungsvermögen des Pflasterbelages auswirkt.

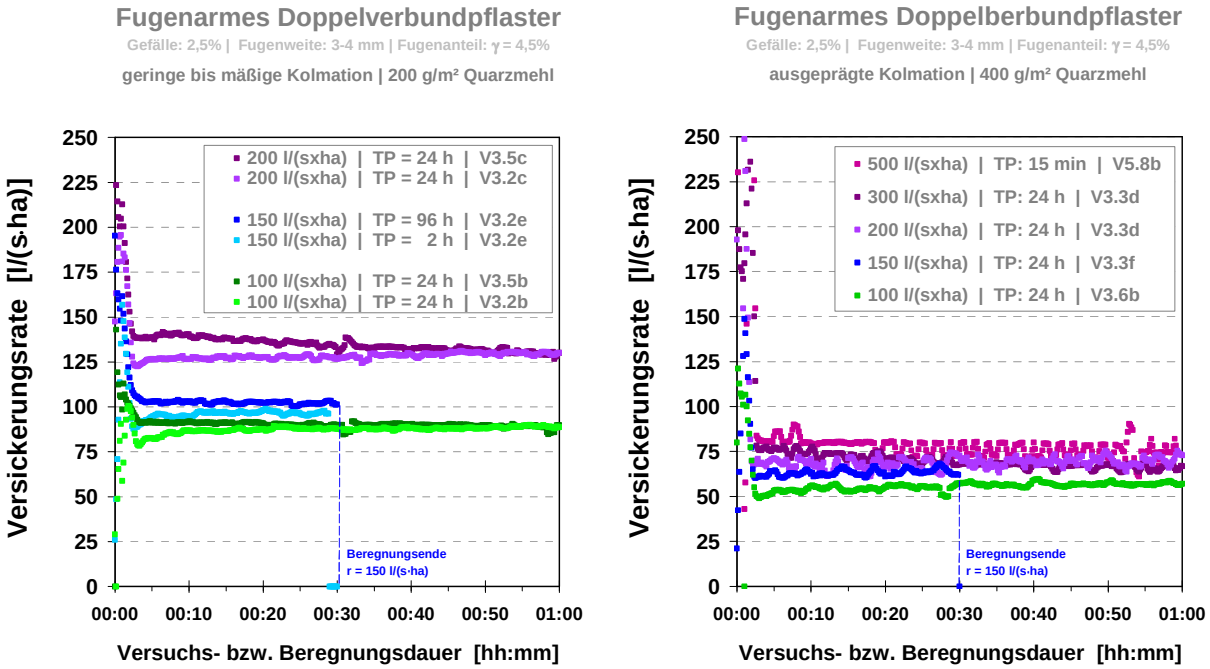


Abbildung 4: **Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei mäßigem sowie bei ausgeprägtem Kolmationsgrad in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität (2,5% Gefälle)[5]**

Die ausgeprägte Korrelation zwischen der Niederschlagsintensität und der dabei resultierenden Infiltrationsrate einerseits als auch der enorme Einfluss des Kolmationsgrades auf das Versickerungsvermögen sind am Beispiel des fugenarmen Verbundpflasters mit einem Gefälle von 2,5% für die Dauerstufe D = 20 min in Abbildung 5 nochmals explizit dargestellt.

In Abbildung 6 ist für den gleichen Belag der Einfluss des Oberflächengefälles auf das Versickerungsvermögen 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.

Im Neuzustand spielt das Oberflächengefälle bei den betrachteten Niederschlagsintensitäten von 100-200 l/(s·ha) keine Rolle, da das Infiltrationsvermögen deutlich höher ist. Bei geringem bis mäßigem Feinpartikeleintrag und entsprechend herabgesetztem Versickerungsvermögen wird dagegen ein nennenswerter

5 TP: Dauer der Trockenperiode vor Beregnungsbeginn

Einfluss sichtbar. Mit zunehmendem Kolmationsgrad nimmt der Einfluss des Oberflächengefälles auf das Versickerungsvermögen zu.

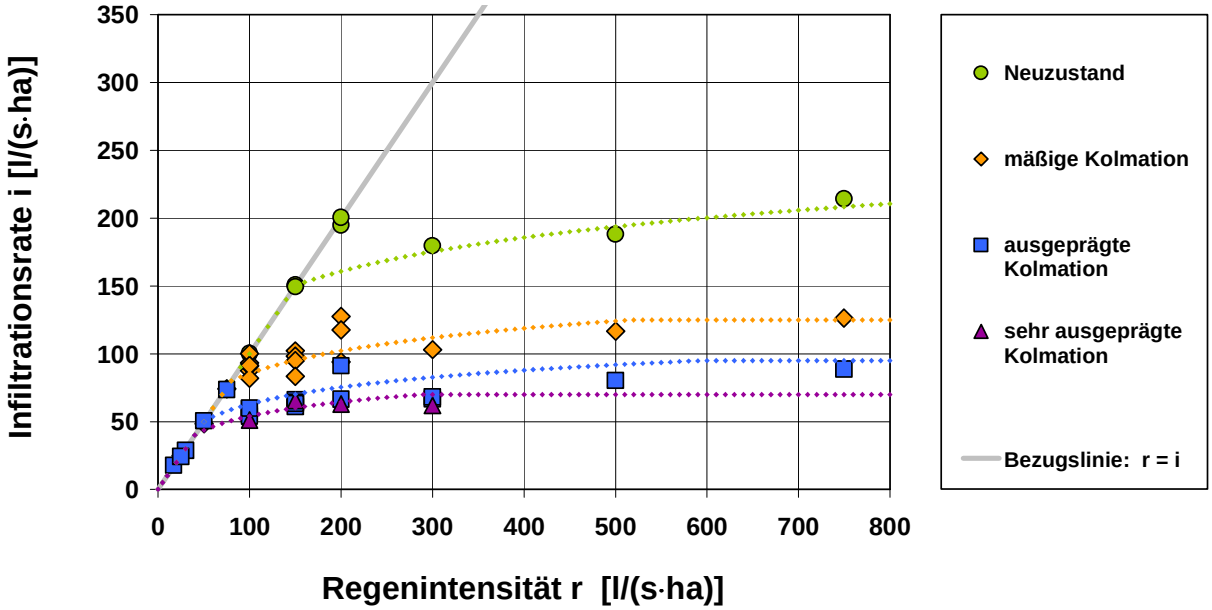


Abbildung 5: **Korrelation zwischen Infiltrationsrate und Niederschlagsintensität am Beispiel eines fugenarmen Verbundpflasters mit 2,5% Gefälle für die Dauerstufe D = 20 min**

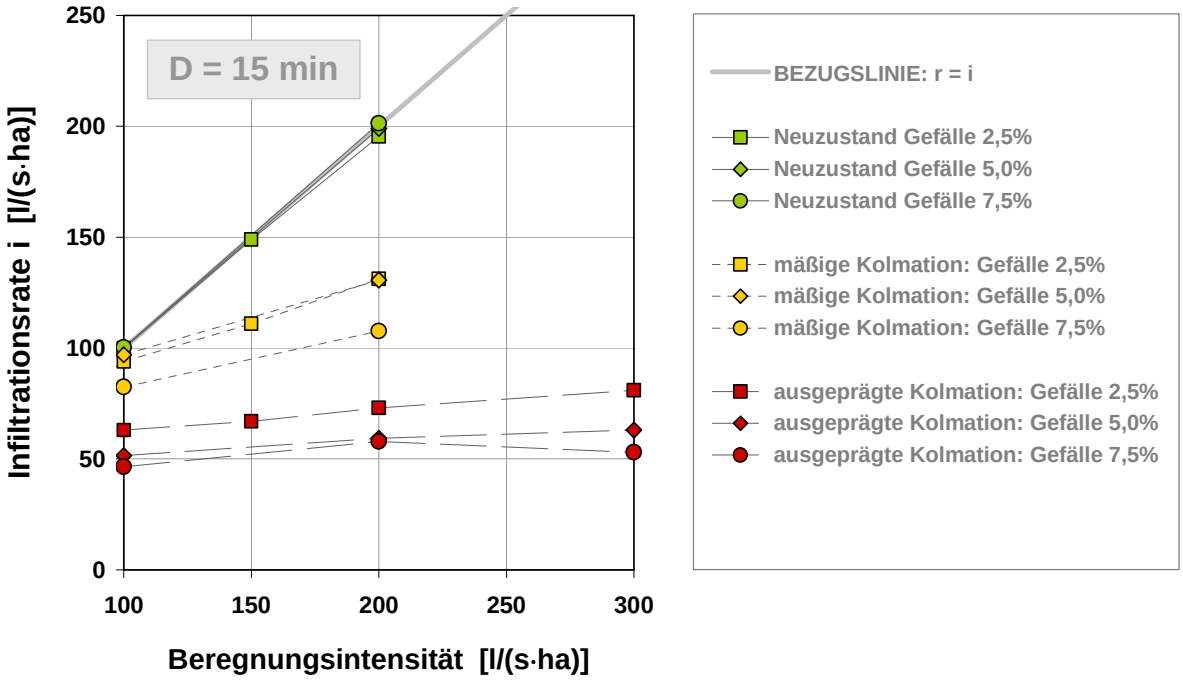


Abbildung 6: **Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters in Abhängigkeit von Beregnungsintensität, Kolmationsgrad und Gefälle (D = 15 min)**

Die Versickerungsrate sinkt dabei tendenziell mit zunehmendem Gefälle ab. Dabei ist zu erwarten, dass die Reduktion der Versickerleistung mit höheren

Gefällestufen sowie bei stärkeren Beregnungsintensitäten immer stärker zu Buche schlägt, da die Fließgeschwindigkeit des über die Pflastersteine in Richtung Fugen abfließendes Regenwassers mit steigendem Gefälle überproportional zunimmt und einer Versickerung entgegenwirkt. Abbildung 6 verdeutlicht jedoch auch, dass das Infiltrationsvermögen in weitaus stärkerem Maße vom Kolmationsgrad sowie der jeweiligen Niederschlagsbelastung bestimmt wird als vom Oberflächengefälle.

Ein ganz ähnliches Verhalten ergab sich bei den Versuchen an fugenarm verlegten Plattenbelägen, wobei hier die Infiltrationsraten aufgrund der geringeren Fugenanteile von lediglich 0,6-1,8% auf entsprechend niedrigerem Niveau liegen (Abbildung 7).

Für den Neuzustand resultierten ebenfalls 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).

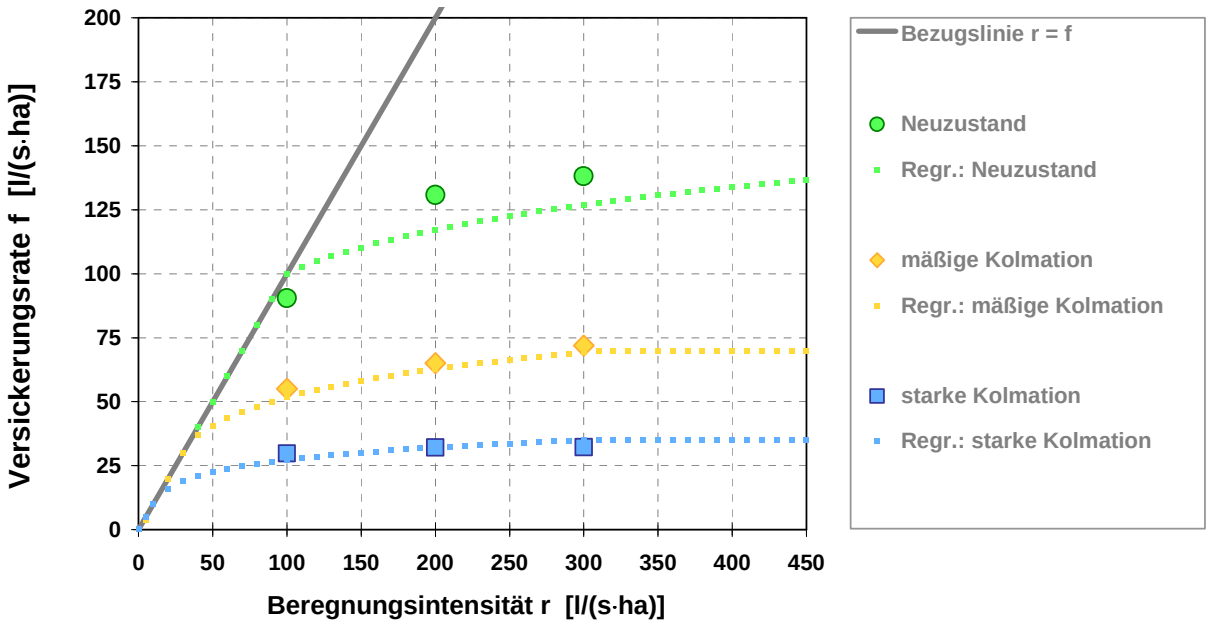


Abbildung 7: **Gegenüberstellung der Infiltrationsraten für einen Plattenbelag mit einem Fugenanteil von 1,8% bei einer Regendauer von D = 30 min**

Dagegen wirkte sich der Fugenanteil im Gebrauchszustand in deutlich geringerem Umfang auf das Infiltrationsvermögen aus. Hier lagen die beobachteten Versickerungsraten aller drei Plattenbeläge in der gleichen Größenordnung. Darüber hinaus war auch kein besonders ausgeprägter Anstieg der Infiltrationsleistung bei steigender Beregnungsintensität zu verzeichnen, zumindest nicht bezogen auf die Absolutwerte der Versickerungsrate. Prozentual gesehen ergaben 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 ergab sich für die betrachteten Beregnungsintensitäten insgesamt eine Variationsbreite der Versickerungsrate von lediglich 25-35 l/(s·ha).

Bei den untersuchten Pflasterbelägen aus Sickerfugensteinen und porösen Betonsteinen entstanden trotz der teilweise extrem großen Mengen an aufgetragenem Quarzmehl auch bei hohen Beregnungsintensitäten keine nennenswerten Oberflächenabflüsse. Die Ergebnisse belegen, dass aufgeweitet splittgefüllte Fugen gegenüber schmaleren und sandgefüllten Fugen vergleichsweise unanfällig gegenüber einem Eintrag von Feinpartikeln sind. Die Wasserdurchlässigkeit der Splittfüllung in den Fugen bzw. der haufwerksporigen Betonsteine ist derart groß, dass selbst hohe Beregnungsintensitäten problemlos und vollständig durch den Oberbau versickern können. Entsprechend ist hier das Oberflächengefälle von untergeordneter Bedeutung.

Charakterisierung des Versickerungsprozesses

Auf der Basis der Untersuchungsergebnisse zusammen mit den zusammen getragenen Erkenntnissen früherer Untersuchungen wurde der Infiltrationsprozess auf wasserdurchlässigen Pflasterflächen wie folgt charakterisiert:

- 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 Körnungsstruktur 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 Deckbela-

ges 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[6] 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 Pflastersteinen eine größere Rolle als bei Flächenbelägen mit einem hohen Anteil an meist splittgefüllten Fugen oder Kam-

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

mern. 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[7] 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 deutlichen höheren Anteils an weiten und engen

[7] Timmermann, U. (1998)

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 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 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.
- Die Tragschicht weist 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 bislang durchgeführten Feld- und Laborversuche ergeben hier kein eindeutiges Bild.

Mathematische Beschreibung des Versickerungs-prozesses

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, dass den o.g. Charakteristika des Infiltrationsprozesses besser gerecht wird. Hierzu wurde ein bi-direktionales Schichtenmodell entworfen, dessen Schema in Abbildung 8 dargestellt ist.

Das Modell folgt in seiner Systemlogik dem prinzipiellen Aufbau einer versickerungsfähig ausgebildeten Flächenbefestigung, die sich aus 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.

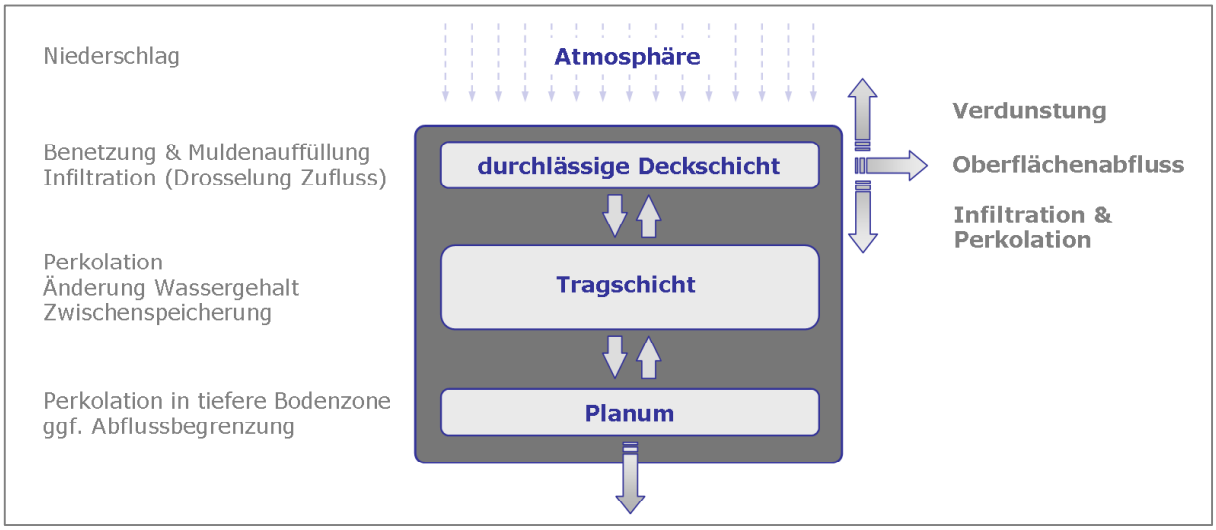


Abbildung 8: Schema des bi-direktionalen Schichtenmodells

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 zeit- und intensitäts-

abhängige Infiltrationsrate wird durch den folgenden mathematischen Term und über sieben flächenspezifische Parameter beschrieben:

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

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

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

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.

Anwendungsempfehlungen für die Urbanhydrologie

Aus den Messergebnissen sowie den gewonnen Erkenntnissen wurden Empfehlungen für die stadthydrologische Praxis abgeleitet. 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.

Abflussbeiwerte wurden für die folgenden Flächentypen jeweils mit Bezug zu Niederschlagsintensität, Oberflächengefälle und Kolmationsgrad abgeleitet:

- fugenarm verlegte Plattenbeläge (Fugenanteil ≤ 3%)
- fugenarm verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 3%-6%)
- fugenreich verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 6%-12%)
- Pflasterbeläge mit splittgefüllten Fugen oder Kammern (Fugenanteil 6-12%)

- poröse Pflasterbeläge aus haufwerksporigen Betonsteinen
- Flächenbefestigungen aus Rasengitter
- Flächenbefestigungen aus Schotterrasen

Abbildung 9 zeigt exemplarisch die empfohlenen Abflussbeiwerte für fugenarm verlegte Pflasterbeläge. Die Empfehlungen zu den übrigen Flächenkategorien sind dem ausführlichen Abschlussbericht zu entnehmen.

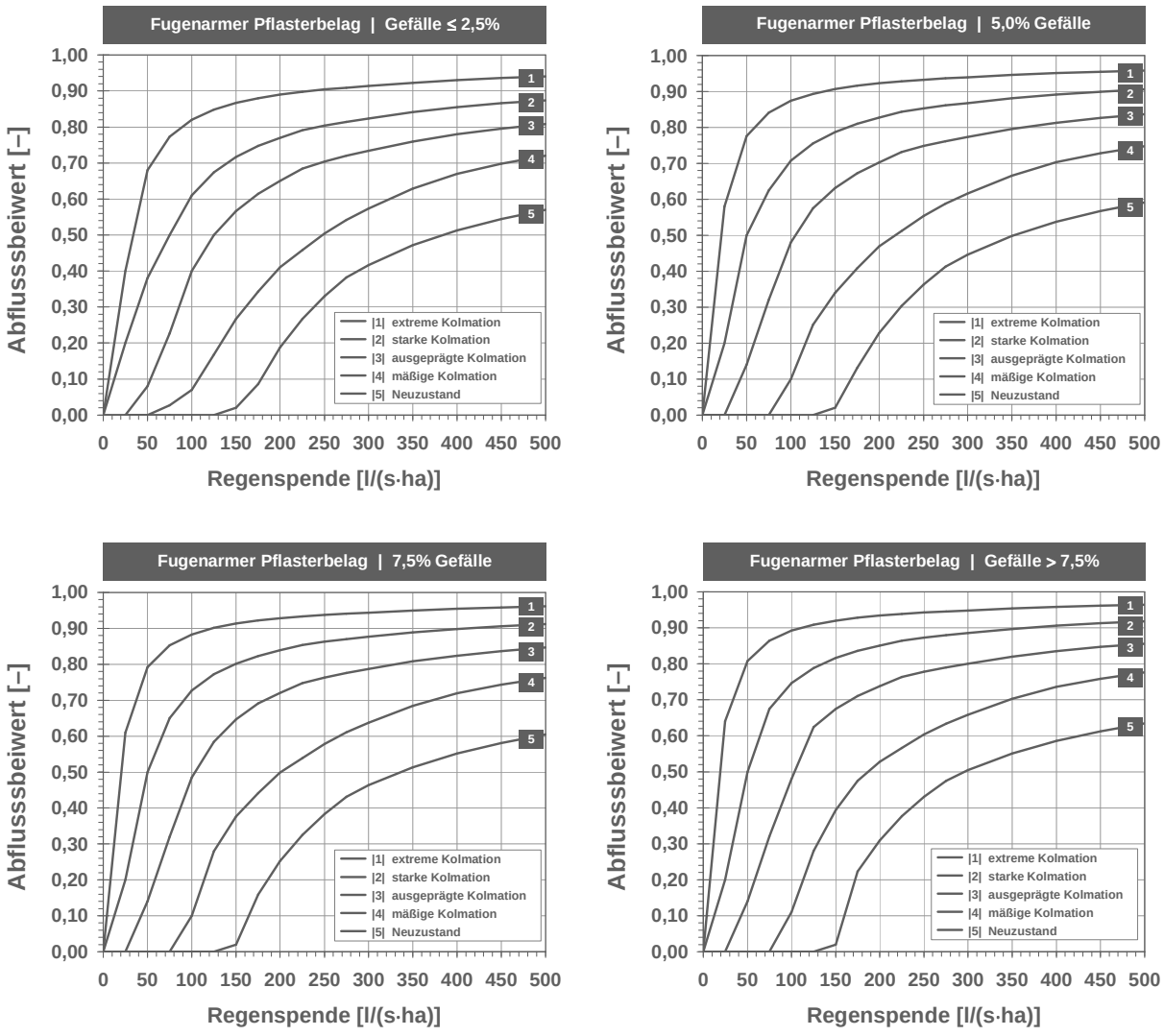


Abbildung 9: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenarm verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 3%-6%)

Der Ansatz nach Horton verwendet vier Modellparameter: die Anfangsversickerungsrate f_0, die Endversickerungsrate f_e, den Abnahmekoeffizient k sowie den Regenerationskoeffizient k_D. Die vier nachstehenden Tabellen 4-7 enthalten die empfohlenen Wertebereiche der Anfangsversickerungsrate sowie der Endversickerungsrate, differenziert nach zwei verschiedenen Kolmationsgraden.

Tabelle 4: 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 Sicker-fugen od. Kammern	3%-6%	Splitt	80-150	90-170	100-190	110-210
Pflasterbelag mit Sicker-fugen 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 5: 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 Sicker-fugen od. Kammern	3%-6%	Splitt	150-500	170-520	190-540	210-560
Pflasterbelag mit Sicker-fugen 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 6: 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 Sicker-fugen od. Kammern	3%-6%	Splitt	50-120	60-135	70-150	80-165
Pflasterbelag mit Sicker-fugen 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 7: 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 Sicker-fugen od. Kammern	3%-6%	Splitt	100-450	120-470	140-490	150-500
Pflasterbelag mit Sicker-fugen 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

Der Ansatz von Horton ist nicht in der Lage das mit der Niederschlagsintensität de facto variierende Versickerungsvermögen widerzuspiegeln. Bei der Betrachtung unterschiedlicher Niederschlagsbelastungen sind folglich unterschiedliche Versickerungsraten anzusetzen. Während dies bei der Berechnung von Einzelereignissen generell möglich ist, muss im Rahmen von Kontinuumssimulationen jedoch ein fester Parametersatz gewählt werden. Je nach Anforderung und Ziel der Planungsaufgabe muss dann entsprechend der dabei im Vordergrund stehenden Ereignischarakteristik ein geeigneter Parametersatz ausgewählt werden. Die je Flächentyp angegebenen Zahlenwerte erstrecken sich mitunter über einen großen Wertebereich und spiegeln damit die hohe Variabilität im Versickerungsvermögen der betrachteten Befestigungsarten wieder.

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. 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.

Als flächenspezifische Anfangsverlusthöhen (Benetzungs- und Muldenverluste) werden die in Tabelle 8 aufgeführten Zahlenwerte empfohlen.

Tabelle 8: 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 Sicker-fugen od. Kammern	3%-6%	Splitt	4,5	5,0
Pflasterbelag mit Sicker-fugen od. Kammern	6%-12%	Splitt	4,5	6,0
Pflassterbelag aus Porenbeton	-|-	-|-	-|-	3,5
Rasengittersteine	-|-	-|-	6,0	6,5
Schotterrasen	-|-	-|-	4,0	4,5

Die 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.[8] 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.[9] 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.

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

[9] z.B. Borgwardt, S. (1994); Hanses et al. (1999) und Timmermann, U. (2000)

Zusammenfassung und Fazit

Planer von Entwässerungssystemen werden zukünftig gefordert sein, das Abfluss und Versickerungsverhalten unbefestigter und durchlässiger befestigter innerhalb von Siedlungsgebieten stärker als bisher zu berücksichtigen – sei es bei der Planung und Dimensionierung dezentraler oder semizentraler 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 und eine Synthese aus den in der Fachliteratur dokumentierten Erkenntnissen gebildet. Den Kern der Untersuchung stellt jedoch ein eigenes umfangreiches Messprogramm dar, 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 dokumentieren die Bandbreite des Versickerungsvermögens nach mehrjähriger Nutzung sowie den nutzungsbedingten Rückgang der Versickerungsleistung durch den Eintrag von Feinpartikeln in die Fugen (Kolmation) oder die sukzessive Nachverdichtung des Oberbaus. 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 ermöglichen.

Die Lysimeterversuche lieferten umfangreiche, belastbare und aussagekräftige Messergebnisse zum Versickerungsvermögen der gängigen Pflasterbauweisen. 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.

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.

Darüber hinaus wurden die Ergebnisse dazu genutzt, einen weitergehenden Modellansatz zur Abflussbildung zu konzipieren. 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. 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.

Literatur

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

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

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.

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.

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.

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).

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.

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.