Das Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen und seine urbanhydrologische Quantifizierung

Dipl.-Ing. Marc Illgen

Kaiserslautern Januar 2009

Das Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen und seine urbanhydrologische Quantifizierung

vom Fachbereich Architektur/Raum- und Umweltplanung/Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern zur Verleihung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

vorgelegt von Dipl.-Ing. Marc Illgen

Dekanin	Prof. Dr. habil. Gabi Troeger-Weiß
Prüfungskommission	
Vorsitzender	Prof. Dr. rer. nat. Robert Jüpner
1. Berichterstatter	Prof. DrIng. Theo G. Schmitt
2. Berichterstatter	Prof. DrIng. Manfred Ostrowski
Datum der Prüfung	23. Januar 2009
Bibliothekszeichen	D 386

When you can measure what you are speaking about and express it in numbers, you know something about it, but when you cannot express it in numbers your knowledge is of a meager and unsatisfactory kind.

Lord Kelvin Physiker und

Ingenieur (1824-1907)

Kurzfassung

Pflasterflächen bilden heute einen hohen Anteil an der befestigten Siedlungsfläche. Dabei kommen diverse Pflastersysteme mit ganz unterschiedlichem Versickerungsvermögen zum Einsatz. Die Quantifizierung des Abflussbeitrages der unterschiedlichen Belagsarten ist jedoch bislang mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, da fundierte und ausreichend differenzierte Kennwerte zum Versickerungsvermögen fehlen.

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurde das Versickerungsvermögen gängiger Pflasterbauweisen systematisch untersucht. Den Kern der Untersuchung bilden mehrere hundert Messungen an Bestandflächen sowie im Labor. Im Zuge der Untersuchungen konnte eine Vielzahl gewinnbringender und teilweise neuer Erkenntnisse zur Charakterisierung und Quantifizierung des Versickerungsphänomens auf durchlässig befestigten Siedlungsflächen gewonnen und zur Ableitung substanzieller Anwendungsempfehlungen genutzt werden.

Mit den erarbeiteten Versickerungskennwerten wird eine deutlich verbesserte und zugleich durch umfangreiche Messungen und Analysen abgesicherte Grundlage zur quantitativen Bewertung des Versickerungsvermögens bereit gestellt. Die Kennwerte tragen hierbei dem Einfluss wesentlicher Randbedingungen wie dem Eintrag von Feinpartikeln in den Fugenraum, der Niederschlagsintensität, dem Gefälle, der Liegezeit sowie der Nutzung Rechnung. Vielfach konnten anhand der Messwertanalysen Erkenntnisse früherer Untersuchungen bestätigt und mit messtechnisch abgesicherten Zahlenwerten untermauert werden. Ferner konnten für zahlreiche Belagsarten Häufigkeitsverteilungen des Versickerungsvermögens generiert werden, mit denen der ausgeprägte stochastische Charakter des Versickerungsverhaltens, der sich in einer enormen Variabilität des Versickerungsvermögens äußert, erstmals quantitativ umschrieben werden kann.

Darüber hinaus wurde ein erster Schritt zu einer verbesserten urbanhydrologischen Erfassung des Abflussverhaltens versickerungsfähiger Siedlungsflächen getätigt. Neben der Ableitung von bauartspezifischen Abflussbeiwerten und Parameterempfehlungen zur Niederschlagsabflusssimulation wurde ein urbanhydrologischer Modellbaustein konzipiert. Die Infiltrationsprozesse werden hierbei über eine modifizierten Ansatz nach Horton/Paulsen abgebildet, bei dem die Berechnungsflächen in Teilflächen diskretisiert und mit nach Auftretenshäufigkeiten gestaffelten Parameterwerten verbunden werden. Der Ansatz hat sich als äußerst effektiv erwiesen und wird daher ausdrücklich zur weiteren programmtechnischen Umsetzung empfohlen.

Abstract

Of all the structures built by human beings, pavements are the most ubiquitous. Hence, the stormwater runoff that pavements control is vast, whereas manifold types of more or less permeable structures exist. However, a lack of validated parameter recommendations as well as adequate methods for modelling stormwater runoff and infiltration processes on pavement structures reflect an evident knowledge deficit regarding the particular infiltration performance of pavements, which can lead to considerable uncertainties of urban drainage computations.

Driven by these deficits, the infiltration performance of various pavement structures has been systematically evaluated within a comprehensive research work. Over 230 field and lab scale experiments have been completed and analyzed for surface runoff and infiltration characteristics as well as for water content changes inside the construction.

The test series comprises several types of conventional and explicitly permeable structures under various boundary conditions. In addition, the field data have been superimposed on the results of former infiltration tests accomplished by several researchers to a unique database containing over 350 single infiltration tests and enabling substantive statistical analyses. To verify and to even extend the database, the very detailed finite element model HYDRUS-2D has been applied on the executed lab tests as well as on additional lab scale scenarios.

Based on these widespread monitoring results together with the simulation results of the HYDRUS-2D application, the primary characteristics of the specific infiltration phenomenon on pavements have been determined. The analyses yield to an identification of the governing constraints, to a quantification of their impacts on the infiltration capacity of the entire pavement construction and finally to the development of an advanced conceptual approach for modelling runoff and infiltration processes on pavement structures.

Moreover, profound recommendations for type specific infiltration rates, runoff coefficients and parameter values for conventional applications have been worked out, which facilitate planners a better estimation of the stormwater runoff contributed by the manifold types of more or less permeable pavements.

Kurzvita des Verfassers



Dipl.-Ing. Marc Illgen

Kanalstraße 21 67655 Kaiserslautern

Tel.: +49 (0) 176 20683350 Email:marc.illgen@alice-dsl.net

geb. am 23.07.1973 in Kusel deutsche Staatsangehörigkeit unverheiratet

Beruflicher Werdegang

seit Okt. 2008	Dahlem – Beratende Ingenieure, Darmstadt
Mai 2001 – Sept. 2008	wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der TU Kaiserslautern
Okt. 2000 – Mai 2001	freier Mitarbeiter am Fachgebiet Siedlungswas- serwirtschaft der TU Kaiserslautern
Febr. 1999 – Sept. 2000	studentische Hilfskraft am Fachgebiet Siedlungs- wasserwirtschaft der TU Kaiserslautern
Febr. 1997 – Sept. 2000	freier Mitarbeiter in der Planungsabteilung der Stadtentwässerung Kaiserslautern

Ausbildung & Studium

Okt. 1993 – April 2001	Studium zum Diplom-Bauingenieur an der TU
	Kaiserslautern
Juni 1993	Abitur am Staatlichen Gymnasium Kusel

Inhalt

Kurzfassung	9
Abstract	
Kurzvita des Verfassers	
Inhalt	15
Abbildungsverzeichnis	
Tabellenverzeichnis	25
Abbildungen und Tabellen im Anhang	

TEIL A GRUNDLAGEN

1	Einl	eitung		35
	1.1	Hinter	grund und Problemstellung	35
	1.2	Zielset	tzung und Schwerpunkt der Arbeit	37
	1.3	Vorgel	hensweise	39
2	Gru	ndlage	n und Kenntnisstand	43
	2.1	Fläche	nbefestigungen in Siedlungsgebieten	43
	2.2	Boden	physikalische Grundlagen	49
		2.2.1	Feststoffmatrix und Porengefüge	49
		2.2.2	Wechselwirkungen zwischen Fest- und Flüssigphase	51
		2.2.3	Hydraulische Leitfähigkeit der Bodenmatrix	54
		2.2.4	Wasserbewegung in einem porösen Medium	56
		2.2.5	Infiltrationsvorgang	57
	2.3	Erfass	ung von Abfluss- und Versickerungsprozessen in der Stadthydrologie	62
		2.3.1	Abflussbeiwertmethode	62
		2.3.2	Modellansätze zur Niederschlags-Abfluss-Simulation	
			wasserdurchlässiger Siedlungsflächen	67
	2.4	Kennti	nisstand zum Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger	
		Pflaste	erbauweisen	73

TEIL B ANALYSE DES VERSICKERUNGSVERHALTENS

3	Vorg	gehens	sweise und Methodik der Datenanalyse	97
	3.1	Metho	discher Ansatz und Systematik der Untersuchung	97
	3.2	Infiltra	itionsversuche an Bestandsflächen	99
	3.3	Statist	ische Analyse des Infiltrationsvermögens	103
	3.4	Abflus	smessungen an Bestandsflächen	107
	3.5	Lysime	eterversuche im Labor	111
		3.5.1 3.5.2 3.5.3	Versuchsanlage Nachbildung von Kolmationserscheinungen im Labor Untersuchte Flächentypen und Flächeneigenschaften	112 115 116
	3.6	Numer	rische Simulation der Strömungsvorgänge im Pflasteraufbau	120
4	Erge	ebnisse	e und Diskussion	127
	4.1	Ergebr	nisse der Infiltrationsversuche an Bestandsflächen	127
		4.1.1	Messungen mittels Tropfinfiltromter	127
		4.1.2	Vergleichsmessungen mittels Doppelring-Infiltrometer	138
		4.1.3	Fazit der Feldversuche an Bestandsflächen	144
	4.2	Statist	ische Analyse des Infiltrationsvermögens	147
		4.2.1 4.2.2	Häufigkeitsverteilungen der Versickerungsleistung Bauliche und standortspezifische Einflussfaktoren auf das	147
		4.2.3	Fazit der statistischen Analyse	150
	4.3	Analys	e externer Abflussmessdaten an Bestandsflächen	161
		4.3.1	Einfluss der Niederschlagcharakteristik auf das Versickerungsvermögen	161
		4.3.2	Einfluss baulicher Gegebenheiten auf das Versickerungsvermögen	170
	1 1	4.3.3	razit aus der Analyse der Abhussmessdaten an bestandsnachen	100
	4.4		Eugenerm verlegte Pflegterheläge avs gefügedichten Betensteinen	190
		4.4.1	Fugenarm verlegte Plattenbeläge	201
		4.4.3	Pflasterbeläge mit aufgeweiteten Sickerfugen	208
		4.4.4	Poröse Pflasterbeläge aus haufwerksporigen Betonsteinen	213
		4.4.5	Fazit der Laborversuche	214
	4.5	Ergebr Pflaste	nisse der numerischen Simulation der Strömungsvorgänge im eraufbau	217
		4.5.1	Erstellung und Kalibrierung der Modelle	217
		4.5.2	Wasserhaushalt und Strömungsvorgänge im Pflasteraufbau	219
		4.5.3	Einfluss der Niederschlagscharakteristik auf die Strömungsprozesse im	222
		4.5.4	Einfluss baulicher Randbedingungen auf die Strömungsprozesse im	
			Pflasteraufbau	228
		4.5.5	Fazit der numerischen Simulation der Strömungsvorgänge im	222
			riidslei dui Ddu	233

4.6	Charal	kterisierung des Versickerungsverhaltens	235
	4.6.1	Phänomenologische Beschreibung des Versickerungsvorganges	235
	4.6.2	Flächenspezifische Kennwerte des Versickerungsvermögens	239

TEIL C URBANHYDROLOGISCHE QUANTIFIZIERUNG DES VERSICKERUNGSVERHALTENS

5	Urb	anhydro	logische Erfassung des Versickerungsverhaltens	247
	5.1	Abflussb	eiwerte zur Dimensionierung entwässerungstechnischer Anlagen	248
	5.2	Modellpa	arameter zur Abflusssimulation	256
	5.3	Urbanhy	drologische Vergleichssimulationen	262
		5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5	Zielsetzung und Vorgehensweise der Simulationsstudie Niederschlagsabflussmodell erwin 4.0 Vergleichssimulationen für Einheitsflächen Vergleichssimulationen für reale und fiktive Einzugsgebiete Fazit und Schlussfolgerungen aus den Vergleichssimulationen	262 263 264 271 275
6	Kon	zeption	eines verbesserten urbanhydrologischen	
	Мос	lellbaus	teins	277
	6.1	Grundko	onzept des Modellbausteins	277
	6.2	Infiltrati	onsmodul	279
	6.3	Speiche	rmodell	282
7	Zus	ammenf	assung und Fazit	284
8	Lite	ratur		289
9	Anh	ang		295
	Anha	ing A-1:	Kennwerte zur Befestigung von Siedlungsflächen	296
	Anha	ing A-2:	Abflussbeiwerte im technischen Regelwerk	298
	Anha	ing A-3:	Zahlen- und Parameterwerte zur Modellierung des Oberflächenabflusses	302
	Anha	ing A-4:	Messergebnisse zum Versickerungsvermögen aus der Fachliteratur	303
	Anha	ing A-5:	Verwendete Messtechnik	310
	Anha	ing A-6:	Versuchsflächen auf dem Campusgelände der TU Kaiserslautern	313
	Anha	ing A-7:	Versuchsfeld Lingen (Ems)	316
	Anha	ing A-8:	Messerwertdarstellung Infiltrometerversuch	318
	Anha	ing A-9:	Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen	319
	Anha	ang A-10:	Messwerte des Versuchsfeldes in Lingen (Ems)	321
	Anha	ng A-11:	Matrizes der durchgeführten Versuchsserien	327
	Anha	ang A-12:	Sieblinien der verwendeten Materialgemische	331

Anhang A-13:	Zusammenhang zwischen Infiltrationsrate und Wassergehalt in der Tragschicht	332
Anhang A-14:	Gegenüberstellung der Infiltrationsraten von Doppelverbund- und Rechteckpflaster	333
Anhang A-15:	Messergebnisse an Plattenbelägen	337
Anhang A-16:	Messergebnisse an Sickerfugenpflaster	341
Anhang A-17:	Numerischen Simulation (HYDRUS-2D)	342
Anhang A-18:	Ablesebeispiele Abflussbeiwerte	349
Anhang A-19:	Urbanhydrologische Vergleichssimulationen	351
Anhang A-20:	Regressionsansatz zur Erfassung des intensitätsabhängigen Versickerungsvermögens	355
Anhang A-21:	Herleitung des Regressionsansatzes	359
Anhang A-22:	Empfehlung flächenspezifischer Anfangsverlusthöhen	369

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prozentuale Anteile unterschiedlicher Flächenbefestigungen an den befestigten Siedlungsflächen der Stadt Dresden
Abbildung 2:	Prozentuale Anteile unterschiedlicher Befestigungstypen an den befestigten Grundstücksfreiflächen der Stadt Leipzig
Abbildung 3:	Zusammenhang zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad für verschiedene Böden und Mineralstoffgemische
Abbildung 4:	Beziehung zwischen Wasserleitfähigkeit und Saugspannung bei einem gesiebten Sand mit Körnung 0/2 mm im Be- und Entwässerungsfall (Hysterese)
Abbildung 5:	Wasserleitfähigkeit am Beispiel dreier verschiedener Bodenmatrices in Abhängigkeit von der Wasserspannung55
Abbildung 6:	Zeitlicher Verlauf der Versickerungsrate 59
Abbildung 7:	Wassergehaltsprofil einer Infiltrationsfront bei Überstau
Abbildung 8:	Gegenüberstellung empfohlener Abflussbeiwerte für verschiedene wasserdurchlässige Flächenbefestigungen67
Abbildung 9:	Anteile des Oberflächenabflusses, der Infiltration, Evaporation und Perkolation an der Jahresniederschlagshöhe für verschiedene Flächenbefestigungen
Abbildung 10:	Messwerte von Borgwardt an neuen und alten Pflasterflächen und daraus abgeleitete Regressionskurven der Infiltrationsrate
Abbildung 11:	Bandbreite der von Borgwardt gemessenen Anfangs- und Endinfiltrationsraten für verschieden Belagstypen
Abbildung 12:	Anfangs- und Endinfiltrationsraten für alte Pflasterflächen mit engen und mit weiten Fugen
Abbildung 13:	Spitzenabflussbeiwerte für verschiedene Flächenbefestigungen für eine 15-minütige Beregnung nach Borgwardt81
Abbildung 14:	Bandbreite der von Nolting et al. gemessenen Versickerungsraten für verschiedene Sickerfugenbeläge und Pflasterflächen aus haufwerksporigen Betonsteinen
Abbildung 15:	Methodischer Forschungsansatz zur Analyse des Versickerungsverhaltens wasserdurchlässiger Pflasterflächen
Abbildung 16:	Übersichtslageplan des Versuchsfeldes in Lingen107
Abbildung 17:	Versuchsfeld Lingen
Abbildung 18:	Pflasterbelagstypen des Versuchsfeldes Lingen109
Abbildung 19:	Abflussganglinie eines Testfeldes aus künstlicher Beregnung und daraus abgeleitete Versickerungsrate111
Abbildung 20:	Schematische Darstellung der Lysimeteranlage

Abbildung 21:	Untersuchungsflächen am Standort Lingen127
Abbildung 22:	Infiltrationsganglinien aus den Messungen an fugenarmem Standardpflaster aus gefügedichten Betonsteinen
Abbildung 23:	Infiltrationsganglinien aus den Messungen an Sickerfugenpflaster aus gefügedichten Betonsteinen mit 10 mm breiten, splittverfüllten Fugen129
Abbildung 24:	Infiltrationsganglinien aus den Messungen an fugenarmem Porenbetonpflaster sowie an Sickerfugenpflaster mit speziell ausgebildeten Ableitungsrinnen
Abbildung 25:	Anfangs- und Endinfiltrationsraten der vier am Standort Lingen untersuchten Pflastertypen131
Abbildung 26:	Untersuchungsflächen am Standort Gelsenkirchen133
Abbildung 27:	Infiltrationsganglinien aus den Messungen an Sickerfugenpflaster mit splittgefüllten Sickerkammern134
Abbildung 28:	Gegenüberstellung der Versickerungsleistungen der untersuchten Sickerfugenbeläge135
Abbildung 29:	Untersuchungsflächen am Standort Kevelaer (Busparkplatz)
Abbildung 30:	Untersuchungsflächen am Standort Straelen (Schulhof)136
Abbildung 31:	Bandbreite der in Straelen und Kevelaer gemessenen Versickerungsraten an Pflasterbelägen aus haufwerksporigen Betonsteinen
Abbildung 32:	Untersuchte Pflasterbelagsarten auf dem Campusgelände der Technischen Universität Kaiserslautern
Abbildung 33:	Variationsbreite der Versickerungsrate für fünf untersuchte Belagsarten auf dem Campusgelände der TU Kaiserslautern
Abbildung 34:	Variationsbreite der Versickerungsrate für konventionelles fugenarm verlegtes Betonpflaster an vier untersuchten Standorten
Abbildung 35:	Untersuchte Pflasterbauweisen aus fugenarmem Rechteck- und Verbundpflaster (Infiltrometertests TU Kaiserslautern)
Abbildung 36:	Bandbreite des Versickerungsvermögens eines konventionellen Verbundpflasterbelages differenziert nach Nutzungsbereichen (Parkplatz Halle 67, TU Kaiserslautern)142
Abbildung 37:	Bandbreite des Versickerungsvermögens eines konventionellen Verbundpflasterbelages bei unterschiedlicher Beanspruchung durch Kraftfahrzeuge (Parkplatz Gebäude 14, TU Kaiserslautern)
Abbildung 38:	Versickerungsleistungen eines fugenarmen Verbundpflasterbelages in Abhängigkeit von der vorangegangenen Trockenperiode (Parkplatz Halle 67, TU Kaiserslautern)
Abbildung 39:	Häufigkeitsverteilung der Endinfiltrationsraten verschiedener Pflasterbauweisen147
Abbildung 40:	Endversickerungsraten konventioneller fugenarmer Funktionspflasterbeläge in Abhängigkeit von Fugenanteil, Fugenkörnung, Liegezeit, überwiegender Flächennutzung sowie verkehrlicher Belastung151
Abbildung 41:	Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen fugenarmer Normalpflasterbeläge bei unterschiedlicher verkehrliche Beanspruchung152
Abbildung 42:	Häufigkeitsverteilung der Endinfiltrationsraten bei fugenarmem Normalpflaster differenziert nach der verkehrlichen Beanspruchung154
Abbildung 43:	Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen fugenarmer Normalpflasterbeläge bei unterschiedlicher Nutzungsdauer

Abbildung 44:	Häufigkeitsverteilung der Endinfiltrationsraten bei fugenarmem Normalpflaster differenziert nach der Nutzungsdauer der Fläche	155
Abbildung 45:	Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen fugenarmer Normalpflasterbeläge differenziert nach verkehrlichen Beanspruchung und Nutzungsdauer	156
Abbildung 46:	Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen bei unterschiedlich langer Trockenperiode vor Versuchsbeginn am Beispiel von fugenarmem Normalpflaster und fugenarmem Porenbetonpflaster	158
Abbildung 47:	Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenhöhe und der maximalen Regenintensität bei natürlichen Niederschlagsereignissen	162
Abbildung 48:	Infiltrationsrate in Abhängigkeit von der maximalen Regenintensität und der Regenhöhe bei natürlichen Niederschlagsereignissen	164
Abbildung 49:	Versickerungsraten in Abhängigkeit von der Regenspende bei natürlicher und künstlicher Beregnung (ausgewählte Testfelder, Lingen)	166
Abbildung 50:	Versickerungsraten in Abhängigkeit von der Trockenperiode vor Regenbeginn (Versuchsfeld, Lingen)	169
Abbildung 51:	Gegenüberstellung des Versickerungsvermögens verschiedener Pflasterbauweisen bei 2,5% und 1,0% Gefälle nach 20-minütiger Beregnung	171
Abbildung 52:	Mittlere prozentuale Abweichungen der Versickerungsrate je Flächenpaar und Beregnungsintensität zwischen Gefällen von 1,0% und 2,5%	172
Abbildung 53:	Prozentuale Abweichung der Versickerungsrate für Vergleichsflächen aus Sickerfugenpflaster bei unterschiedlichem Fugenmaterial	174
Abbildung 54:	Gegenüberstellung der Versickerungsraten für Vergleichsflächen aus Sickerfugenpflaster bei unterschiedlichem Bettungsmaterial	175
Abbildung 55:	Mittlere prozentuale Differenzen in den Versickerungsraten an den Belagstypen B4 und B7 bei unterschiedlichem Tragschichtmaterial	175
Abbildung 56:	Mittlere prozentuale Abweichungen der Versickerungsrate je Flächen-paar und Beregnungsintensität zwischen Testfeldern ohne und mit abgedichtetem Planum	177
Abbildung 57:	Flächenbeläge aus fugenarmem Doppelverbund- und Rechteckpflaster	180
Abbildung 58:	Schemaskizze des Pflasteraufbaus	181
Abbildung 59:	Messwertdarstellung für einen Beregnungsversuch an Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle (400 g/m² Quarzmehl, r = 100 l/(s·ha))	182
Abbildung 60:	Messwertdarstellung für einen Beregnungsversuch an Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle (200 g/m² Quarzmehl, r = 200 l/(s·ha))	184
Abbildung 61:	Matrix der an fugenarmem Doppelverbundpflaster durchgeführten Beregnungsversuche	185
Abbildung 62:	Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei mäßigem sowie bei ausgeprägtem Kolmationsgrad in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität (2,5% Gefälle)	186
Abbildung 63:	Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters in Abhängigkeit von Beregnungsintensität, Kolmationsgrad und Gefälle (D =	
	15 min)	188

Abbildung 64:	Messwertdarstellung für einen Laborversuch mit intensitätsvariabler Beregnung an einem Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle und ausgeprägtem Kolmationsgrad
Abbildung 65:	Versickerungsleistungen eines fugenarmen Verbundpflasters mit 2,5% Gefälle in Abhängigkeit von der Regenintensität und dem Kolmationsgrad bei 20-minütiger Beregnung191
Abbildung 66:	Messergebnisse der Versickerungsrate und des Wassergehaltes bei intermittierender Beregnung an einem Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle bei ausgeprägter Kolmation (400 g/m ² Quarzmehl)195
Abbildung 67:	Zusammenhang zwischen der Versickerungsrate und dem Wassergehalt in den oberen Tragschichthorizonten bei einem Doppelverbundpflasterbelag mit ausgeprägtem Kolmationsgrad197
Abbildung 68:	Abflussbeiwerte eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei 2,5% Gefälle und ausgeprägter Kolmation für verschiedene Dauerstufen
Abbildung 69:	Abflussbeiwerte eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei 2,5% Gefälle und mäßiger Kolmations für verschiedene Dauerstufen
Abbildung 70:	Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten201
Abbildung 71:	Infiltrationsverläufe der untersuchten Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten im Neuzustand (Gefälle 2,5%)
Abbildung 72:	Infiltrationsverläufe der untersuchten Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten im Gebrauchszustand (Gefälle 2,5%)
Abbildung 73:	Messergebnisse an Plattenbelägen mit einem Fugenanteil von 1,8%205
Abbildung 74:	Flächenbeläge aus Betonsteinen mit splittverfüllten Sickerfugen209
Abbildung 75:	Messergebnisse eines Pflasterbelages mit splittverfüllter Sickerfuge von 10 mm Breite bei einer Quarzmehlmenge 4000 g/m ² (Gefälle 2,5%, Lagerung über 40 cm mächtiger Schottertragschicht)210
Abbildung 76:	Sickerabflussraten eines Pflasterbelages mit splittverfüllter Sickerfuge von 10 mm Breite bei unterschiedlichen Quarzmehlmengen
	(Beregnungsintensität 300 l/(s·ha)211
Abbildung 77:	Flächenbeläge aus porösen Betonsteinen213
Abbildung 78:	Materialverteilung und Rasternetz finiter Elemente eines Pflasteraufbaus aus fugenarmem Verbundpflaster (Vertikalschnitt)218
Abbildung 79:	Simulationsergebnisse für einen mäßig kolmatierten Pflasteraufbau aus fugenarmem Verbundpflaster bei 30-minütiger Beregnung mit 200 I/(s·ha)219
Abbildung 80:	Wassergehalt in einem mäßig kolmatierten Pflasteraufbau aus fugenarmem Verbundpflaster während einer 30-minütigen Beregnung mit 200 l/(s·ha)
Abbildung 81:	Aufbau und Wassergehaltsprofil eines Plattenbelages bei zweistündiger Beregnung mit 100 l/(s·ha)221
Abbildung 82:	Aufbau und Wassergehaltsprofil eines Sickerfugenpflasters bei zweistündiger Beregnung mit 200 l/(s·ha)221
Abbildung 83:	Korrelation zwischen Regenintensität und Infiltrationsrate für Pflasterungen aus Verbundpflaster und Kleinformatplatten (Simulation HYDRUS-2D)223
Abbildung 84:	Simulierte Versickerungs- und Abflussraten eines fugenarmen Verbundpflasters mit ausgeprägter Kolmation bei variabler Regenintensität224

Abbildung 85:	Querschnittssegment des Pflasteraufbaus zur Detailanalyse des Versickerungsprozesses im Fugenraum2	224
Abbildung 86:	Wassergehaltsprofil im Fugenraum eines Pflasterbelages mit schmaler Fuge bei 30-minütiger Beregnung mit 200 l/(s·ha)2	225
Abbildung 87:	Wassergehalts- und Saugspannungsverlauf im Fugenraum eines fugenarmen Verbundpflaster in Abhängigkeit von der Regenintensität (1 cm unterhalb der Fugenoberkante)2	226
Abbildung 88:	Simulierte Versickerungs- und Abflussraten eines fugenarmen Verbundpflasters mit ausgeprägter Kolmation bei intervallartiger Beregnung mit unterschiedlich langen Trockenperioden	227
Abbildung 89:	Hydraulische Leitfähigkeiten und Saugspannungen der betrachteten Bettungsmaterialien in Abhängigkeit vom volumetrischen Wassergehalt2	228
Abbildung 90:	Infiltrationsraten eines fugenarmen Verbundpflasterbelages mäßigen Kolmationsgrades bei unterschiedlichen Bettungsmaterialien und Niederschlagsbelastungen2	229
Abbildung 91:	Hydraulische Leitfähigkeiten und Saugspannungen der betrachteten Tragschichtmaterialien in Abhängigkeit vom Wassergehalt2	229
Abbildung 92:	Infiltrationsraten eines fugenarmen Verbundpflasterbelages mit ausgeprägter Kolmation bei unterschiedlichen Tragschichtmaterialien und Niederschlagsbelastungen2	230
Abbildung 93:	Hydraulische Leitfähigkeiten und Saugspannungen der betrachten Plana in Abhängigkeit vom Wassergehalt2	231
Abbildung 94:	Infiltrationsraten eines fugenarmen Verbundpflasterbelages bei unterschiedlichen Untergrundverhältnissen, Niederschlagsbelastungen und Kolmationsgraden (Tragschichtmächtigkeit 30 cm)2	232
Abbildung 95:	Infiltrationsraten von Belägen aus Betonplatten und Sickerfugenpflaster bei unterschiedlichen Untergrundverhältnissen und Tragschichtstärken2	232
Abbildung 96:	Wassergehalt in einem mäßig kolmatierten Pflasteraufbau aus fugenarmem Verbundpflaster mit 15 cm starker Tragschicht auf gering durchlässigem Untergrund bei zweistündiger Beregnung mit 100 l/(s·ha)2	233
Abbildung 97:	Häufigkeitsverteilung des Versickerungsvermögens typischer Plasterbauweisen2	236
Abbildung 98:	Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenarm verlegte Plattenbeläge (Fugenanteil ≤ 3%)	250
Abbildung 99:	Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenarm verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 3%-6%)	251
Abbildung 100:	Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenreich verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 6%-12%)2	252
Abbildung 101:	Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für Pflasterbeläge mit splittgefüllten Fugen oder Kammern (Fugenanteil 6%-12%)2	253
Abbildung 102:	Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für poröse Pflasterbeläge aus haufwerksporigen	
	Betonsteinen2	254

Abbildung 103:	Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für Flächenbefestigungen aus Rasengitter und Schotterrasen	255
Abbildung 104:	Verlauf der Infiltrationsrate im Ansatz nach Horten für verschiedene Abnahmekoeffizienten	259
Abbildung 105:	Verlauf der Infiltrationsrate im Ansatz nach Horten für verschiedene Regenerationskoeffizienten	260
Abbildung 106:	Gegenüberstellung empfohlener und bei unterschiedlichen Parameterannahmen berechneter Abflussbeiwerte für fugenarmes Normalpflaster und Porenbetonpflaster bei ausgeprägter Kolmation	264
Abbildung 107:	Simulationsergebnisse für fugenarmes Standardpflaster bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung und variierenden Regenintensitäten	267
Abbildung 108:	Prozentuale Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung für fugenarmes Standardpflaster und variierenden Regenintensitäten	267
Abbildung 109:	Mittlere Jahresabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe und dem Differenzierungsgrad der Flächenabbildung im Modell	270
Abbildung 110:	Campusgelände der TU Kaiserslautern aus der Vogelperspektive	272
Abbildung 111:	Simulationsergebnisse für ein reales Einzugsgebiet bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung und variierenden Regenintensitäten	273
Abbildung 112:	Prozentuale Abweichungen zwischen den Simulationsergebnisse für ein reales Einzugsgebiet bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung und varijerenden Regenintensitäten	273
Abbildung 113:	Schema des bi-direktionalen Schichtenmodells	273
Abbildung 114:	Staffelung der Versickerungsparameter entsprechend ihrer	
······································	Auftretenshäufigkeit bei unterschiedlichen Diskretisierungsstufen	280

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gängige Arten wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen	44
Tabelle 2:	Beziehung zwischen Porengrößen und Matrixpotenzial sowie daraus abgeleitete Wasserbindungsformen	50
Tabelle 3:	Empfohlene Abflussbeiwerte für unterschiedliche Flächenbefestigungen6	54
Tabelle 4:	Bodenarten und Parameter für den erweiterten Ansatz nach Horten /Paulsen	70
Tabelle 5:	Parameterwerte zur Abflussbildung nach Schmitt und Illgen (2001)	71
Tabelle 6:	Endversickerungsraten für verschiedene naturnahe Flächenbefestigungen nach Dellwig	76
Tabelle 7:	Bandbreite des in der Fachliteratur angegebenen Versickerungsvermögens wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen im Gebrauchszustand	92
Tabelle 8:	Übersicht der Untersuchungsflächen der Infiltrometermessungen10)1
Tabelle 9:	Übersicht der mittels Doppelring-Infiltrometer beprobten	
	Untersuchungsflächen10)2
Tabelle 10:	Anzahl der je Flächentyp in der Datenbasis enthaltenen Datensätze)4
Tabelle 11:	Matrix der erfassten Flächen- und Versuchscharakteristika10)6
Tabelle 12:	Belagstypen des Versuchsfelde in Lingen10	38
Tabelle 13:	Übersicht der Versuchsserien am Lysimeter1	17
Tabelle 14:	Übersicht der Vergleichssimulationen mittels HYDRUS-2D12	25
Tabelle 15:	Modellparameter nach van Genuchten zur numerischen Simulation eines Pflasteraufbaus aus fugenarmem Verbundpflaster	18
Tabelle 16:	Bauartspezifische Kennwerte des Versickerungsmögen in Abhängigkeit von der Auftretenswahrscheinlichkeit24	40
Tabelle 17:	Bauartspezifische Kennwerte des Versickerungsmögen in Abhängigkeit von der verkehrlichen Belastung durch Kraftfahrzeuge	40
Tabelle 18:	Bauartspezifische Kennwerte des Versickerungsmögen in Abhängigkeit von der Liegezeit der Fläche24	41
Tabelle 19:	Baurtspezifische Kennwerte des Versickerungsmögen in Abhängigkeit vom Oberflächengefälle24	42
Tabelle 20:	Empfohlener Wertebereich der Anfangsversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [I/(s·ha)] bei deutlicher Kolmation	57
Tabelle 21:	Empfohlener Wertebereich der Anfangsversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [I/(s·ha)] bei mäßiger Kolmation	57
Tabelle 22:	Empfohlener Wertebereich der Endversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei deutlicher Kolmation25	58
Tabelle 23:	Empfohlener Wertebereich der Endversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei mäßiger Kolmation25	58

Tabelle 24:	Gewählte Versickerungsparameter für fugenarmes Standardpflaster bei	
	unterschiedlicher Flächendifferenzierung im Modell	266
Tabelle 25:	Abminderungsfaktoren ζ_J der Infiltrationsrate in Abhängigkeit vom	
	Oberflächengefälle	281

Abbildungen und Tabellen im Anhang

Abbildungen im Anhang

Abbildung A - 1:	Versiegelungsgrade deutscher Großstädte	.296
Abbildung A - 2:	Prozentuale Flächenanteile verschiedener Pflasterbauweisen an den befestigten Grundstücksfreiflächen (ohne Verkehrsflächen)	297
Abbildung A - 3:	Gemessene Infiltrationsverläufe für verschiedene Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow	.307
Abbildung A - 4:	Infiltrationsraten von Pflasterflächen in Abhängigkeit vom Fugenanteil nach Borgwardt	.308
Abbildung A - 5:	Infiltrationsraten von neuen Pflasterflächen mit aufgeweiteten Fugen, Kammern oder Sickeröffnungen nach Borgwardt	.308
Abbildung A - 6:	Infiltrationsraten von Pflasterflächen in Abhängigkeit von der Nutzung	.309
Abbildung A - 7:	Tropfinfiltrometer	.310
Abbildung A - 8:	Lysimeteranlage für wasserdurchlässige Flächenbeläge im IKT	.311
Abbildung A - 9:	Bauteile der Lysimeteranlage	.312
Abbildung A - 10:	Lage der Untersuchungsflächen rund um Gebäude 14 der TU Kaiserslautern	.313
Abbildung A - 11:	Lage der Untersuchungsfläche vor Halle 67 der TU Kaiserslautern	.313
Abbildung A - 12:	Untersuchungsstandorte der Vergleichsmessungen mittels Doppelring- Infiltrometer auf dem Campusgelände der TU Kaiserslautern	.314
Abbildung A - 13:	Untersuchungsstandorte der Vergleichsmessungen mittels Doppelring- Infiltrometer auf dem Campusgelände der TU Kaiserslautern	.315
Abbildung A - 14:	Stellplatzbereiche geringerer und höherer Beanspruchung durch parkenden Kraftfahrzeuge	.315
Abbildung A - 15:	Versuchsfeld in Lingen (Ems) auf dem Parkplatz des Freizeitbades und des Sportstadions	.316
Abbildung A - 16:	Matrix der baulichen Charakteristika der Testflächen auf dem Untersuchungsfeld in Lingen (Ems)	.317
Abbildung A - 17:	Gegenüberstellung der Ganglinienverläufe von Ist-Werten und fortlaufenden Mittelwerten der Versickerungsrate am Beispiel der Messwerte des Untersuchungsstandorts Gelsenkirchen	.318
Abbildung A - 18:	Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen von Belägen aus Sickerfugenpflaster differenziert nach Nutzung und Liegezeit	.319
Abbildung A - 19:	Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen von Belägen aus Porenbetonpflaster differenziert nach Nutzung und Liegezeit	.319
Abbildung A - 20:	Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen von Rasengitterbelägen differenziert nach Nutzung und Liegezeit	.319

Abbildung A - 21:	Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen von Belägen aus konventionellem Pflaster mit erhöhten Fugenanteil (> 6%) differenziert nach verkehrlicher Beanspruchung und Liegezeit	20
Abbildung A - 22:	Ganglinien der Beregnungsintensität, des Oberflächenabflusses sowie der rechnerischen Versickerungsrate für exemplarische Testfelder bei Versuchen mit künstlicher Beregnung (Lingen)	21
Abbildung A - 23:	Korrelation zwischen Versickerungsvermögen und Niederschlagshöhe (Versuchsfeld Lingen)	22
Abbildung A - 24:	Versickerungsraten in Abhängigkeit von der Trockenperiode vor Regenbeginn (Versuchsfeld, Lingen)32	23
Abbildung A - 25:	Mittlere Versickerungsrate je Testfeld und Beregnungsintensität (Flächenpaare mit 2,5% und 1,0% Gefälle; Versuchsfeld Lingen)32	24
Abbildung A - 26:	Mittlere prozentuale Abweichungen der Versickerungsrate für Flächenpaare mit 2,5% und 1,0% Gefälle (Versuchsfeld Lingen)32	24
Abbildung A - 27:	Differenzen in den Versickerungsraten an den Belagstypen B4 und B7 bei unterschiedlichem Tragschichtmaterial (Versuchsfeld, Lingen)32	25
Abbildung A - 28:	Mittlere prozentuale Abweichungen der Versickerungsrate für Flächenpaare mit und ohne Abdichtung des Planums (Versuchsfeld Lingen)32	25
Abbildung A - 29:	Abflussganglinien an Flächenpaaren mit und ohne abgedichtetem Planum für intensitätsstarke und volumenreichen Ereignisse	26
Abbildung A - 30:	Versuchsmatrix der Versuchsserie 1 an Sickerfugenpflaster mit splittverfüllten Fugen (Fugenweite 10 mm)	27
Abbildung A - 31:	Versuchsmatrix der Versuchsserie 2 an fugenarmem Rechteckpflaster32	27
Abbildung A - 32:	Versuchsmatrix der Versuchsserie 3 an fugenarmem Doppelverbundpflaster	28
Abbildung A - 33:	Versuchsmatrix der Versuchsserie 4 an Sickerfugenpflaster mit splitt- verfüllten Fugen (Fugenweite 10 mm)32	28
Abbildung A - 34:	Versuchsmatrix der Versuchsserie 5 an verschiedenen Deckbelägen und an Schotterschichten in singulärer Aufstellung32	29
Abbildung A - 35:	Versuchsmatrix der Versuchsserie 6 an fugenarmem Porenbetonpflaster mit hohem Gefälle	29
Abbildung A - 36:	Versuchsmatrix der Versuchsserie 7 an fugenarmen Plattenbelägen mit unterschiedlichen Fugenanteilen	30
Abbildung A - 37:	Sieblinie des als Tragschichtmaterial verwendeten Korngemisches	31
Abbildung A - 38:	Sieblinie des zur Herstellung eines gering durchlässigen Planums verwendeten Korngemisches aus 50% Quarzsand und 50% Quarzmehl32	31
Abbildung A - 39:	Korrelationen zwischen Infiltrationsrate und Wassergehalt in der Tragschicht für einen Doppelverbundpflasterbelag	32
Abbildung A - 40:	Gegenüberstellung der Infiltrationsraten von Doppelverbund- und Rechteckpflaster für verschiedene Beregnungsintensitäten, Kolmati- onsgraden und Dauerstufen (Gefälle 2.5%)	33
Abbildung A - 41:	Infiltrationsganglinien von fugenarmen Doppelverbund- und Rechteckpflasterbelägen für Beregnungsversuche mit 75 l/(s·ha), 200 l/(s·ha) und 1000 l/(s·ha) bei einem Gefälle 2,5%	34
Abbilduna A - 42:	Aufbau der untersuchten Plattenbeläge (Schemaskizze)	37
Abbilduna A - 43:	Versickerungsraten fugenarmer Plattenbeläge in Abhängigkeit vom	
	Fugenanteil (D = 30 min)	38

Abbildung A - 44:	Versickerungsraten fugenarmer Plattenbeläge in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität (D = 30 min)	.338
Abbildung A - 45:	Rückgang der Infiltrationsraten während des Einspülvorganges bei den untersuchten Plattenbelägen (Versuchsserie 7)	.339
Abbildung A - 46:	Messergebnisse des Versuchs V7.4a mit unvollständiger Kolmatierung des Plattenbelages auf gering durchlässigem Planum	.339
Abbildung A - 47:	Abflussbeiwerte eines Plattenbelages mit einem Fugenanteil von 1,8% bei einem Gefälle von 2,5% in Abhängigkeit von Beregnungsintensität und Kolmationsgrad	.340
Abbildung A - 48:	Abflussbeiwerte eines Plattenbelages mit einem Fugenanteil von 0,6% bei einem Gefälle von 2,5% in Abhängigkeit von Beregnungsintensität und Kolmationsgrad	.340
Abbildung A - 49:	Messergebnisse eines Pflasterbelages mit splittverfüllter Sickerfuge von 7 mm Breite in singulärer Anordnung ohne Tragschicht (1000 g/m ² Quarzmehl, 2,5% Gefälle)	.341
Abbildung A - 50:	Hydraulische Leitfähigkeiten und Saugspannungen verschiedener Materialien einer Pflasterkonstruktion in Abhängigkeit vom Wassergehalt	.342
Abbildung A - 51:	Gegenüberstellung gemessener und simulierter Volumenströme für fugenarmes Doppelverbundpflaster bei mäßiger Kolmation bei einer Beregnungsintensität von 100 l/(s·ha)	.345
Abbildung A - 52:	Gegenüberstellung gemessener und simulierter Volumenströme für fugenarmes Doppelverbundpflaster bei mäßiger Kolmation bei einer Beregnungsintensität von 100 l/(s·ha)	.345
Abbildung A - 53:	Gegenüberstellung gemessener und simulierter Volumenströme für fugenarmes Doppelverbundpflaster bei mäßiger Kolmation bei einer Beregnungsintensität von 200 l/(s·ha)	.346
Abbildung A - 54:	Gegenüberstellung gemessener und simulierter Volumenströme für fugenarmes Doppelverbundpflaster bei mäßiger Kolmation bei einer Beregnungsintensität von 200 l/(s·ha)	.346
Abbildung A - 55:	Infiltrationsrate eines natürlichen Bodens bei Beregnung mit konstanter Intensität (Simulation Hydrus-2D für einen lehmigen Sand auf einer Schicht aus sandigem Lehm)	.347
Abbildung A - 56:	Wassergehalts- und Saugspannungsverläufe in verschiedenen Höhenhorizonten des Pflasteraufbaus eines fugenarmen Verbundpflaster bei einem vereinfachten Modellregen (Euler-Typ II)	.347
Abbildung A - 57:	Infiltrationsraten eines fugenarmen Plattenbelages geringer Kolmation bei unterschiedlichen Bettungsmaterialien	.348
Abbildung A - 58:	Nomogramme zur Bestimmung von Abflussbeiwerten	.349
Abbildung A - 59:	Prozentuale Abweichungen der rechnerischen Abflussvolumina gegenüber dem höchsten Differenzierungsgrad (D10) bei exemplarischen Einzelereignissen	.352
Abbildung A - 60:	Prozentuale Abweichungen der rechnerischen Abflussspitzen gegenüber dem höchsten Differenzierungsgrad (D10) bei exemplarischen Einzelereignissen	.352
Abbildung A - 61:	Prozentuale Abweichungen zwischen den Simulationsergebnisse bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung für Rasenpflaster bei variierenden Regenintensitäten.	.353

Abbildung A - 62:	Prozentuale Abweichungen zwischen den Simulationsergebnisse bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung für fugenarmes Porenbetonpflaster bei variierenden Regenintensitäten	.353
Abbildung A - 63:	Systemplan des entwässerungstechnischen Einzugsgebietes 'TU Kaiserslautern'	.354
Abbildung A - 64:	Korrelation zwischen Infiltrationsrate und Niederschlagsintensität am Beispiel eines fugenarmen Verbundpflasters mit 2,5% Gefälle für die Dauerstufe D = 20 min	.355
Abbildung A - 65:	Gegenüberstellung gemessener und errechneter Infiltrationsraten für einen Plattenbelag mit einem Fugenanteil von 1,8% bei einer Regendauer von D = 30 min	.357
Abbildung A - 66:	Korrelation zwischen Infiltrationsrate und Niederschlagsintensität am Beispiel eines fugenarmen Verbundpflasters mit 2,5% Gefälle für verschiedene Dauerstufen zwischen 5 min und 60 min	.359
Abbildung A - 67:	Parameterwerte A zur Regression der Infiltrationsrate	.361
Abbildung A - 68:	Parameterwerte B zur Regression der Infiltrationsrate	.361
Abbildung A - 69:	Parameterwerte f _{max} zur Regression der Infiltrationsrate	.361
Abbildung A - 70:	Korrelation der Parameterwerte A, B und f _{max}	.363
Abbildung A - 71:	Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und f _{max} für einen Flächenbelag im Neuzustand	.363
Abbildung A - 72:	Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und f _{max} für einen Flächenbelag mit mäßigem Kolmationsgrad	.364
Abbildung A - 73:	Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und f _{max} für einen Flächenbelag mit ausgeprägtem Kolmationsgrad	.364
Abbildung A - 74:	Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und B für einen Flächenbelag im Neuzustand	.364
Abbildung A - 75:	Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und B für einen Flächenbelag mit mäßigem Kolmationsgrad	.365
Abbildung A - 76:	Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und B für einen Flächenbelag mit ausgeprägtem Kolmationsgrad	.365
Abbildung A - 77:	Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und B für einen Flächenbelag mit starkem Kolmationsgrad	.365

Tabellen im Anhang

Tabelle A - 1:	Abflussbeiwerte nach ATV-DVWK-M 153 (2000) zur Anwendung nach DWA-A 138 und ATV-DVWK-M 153	298
Tabelle A - 2:	Abflussbeiwerte ψ_{A128} nach ATV-DVWK-M 177 (2001) zur Ermittlung der Rechengröße $A_{u,A128}$ nach ATV-Arbeitsblatt A 128	299
Tabelle A - 3:	Abflussbeiwerte nach DIN EN 752-4 (1997)	299
Tabelle A - 4:	Abflussbeiwerte nach DIN 1986-100 (2007)	300
Tabelle A - 5:	Empfohlene Spitzenabflussbeiwerte nach DWA-Arbeitsblatt A 118 (2006) in Abhängigkeit vom Befestigungsgrad γ	301

Tabelle A - 6:	Monatsspezifische Reduzierungsfaktoren der Benetzungsverlusthöhen und Monatswerte der mittleren täglichen Verdunstungsraten	302
Tabelle A - 7:	Abfluss- und Versickerungskennwerte für verschieden Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow für neue Flächenbefestigungen	304
Tabelle A - 8:	Abfluss- und Versickerungskennwerte für verschieden Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow für gealterte Flächenbefestigungen	305
Tabelle A - 9:	Abfluss- und Versickerungskennwerte für verschieden Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow für wassergebundene Decken	306
Tabelle A - 10:	Modellparameter nach van Genuchten zur numerischen Simulation eines Plattenbelages im Gebrauchszustand	342
Tabelle A - 11:	Modellparameter nach van Genuchten zur numerischen Simulation eines Sickerfugenpflasters im Gebrauchszustand	342
Tabelle A - 12:	Modellparameter der betrachteten Bettungsmaterialien	343
Tabelle A - 13:	Modellparameter der betrachteten Tragschichtmaterialien	343
Tabelle A - 14:	Modellparameter der betrachteten Plana (Unterlagen des Pflasters)	344
Tabelle A - 15:	Gewählte Versickerungsparameter für Rasenpflaster bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung im Modell	351
Tabelle A - 16:	Gewählte Versickerungsparameter für fugenarmes Porenbetonpflaster bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung im Modell	351
Tabelle A - 17:	Zahlenwerte der Regressionsparameter zweiter Ordnung für einen fugenarmen Pflasterbelag (fugenarmes Verbundpflaster, 2,5% Gefälle)	362
Tabelle A - 18:	Zahlenwerte der Modellparameter des Infiltrationsmodells für einen fugenarmen Pflasterbelag für verschiedene Kolmationsgrade	366
Tabelle A - 19:	Abminderungsfaktoren ζ _J der Infiltrationsrate in Abhängigkeit vom Oberflächengefälle	367
Tabelle A - 20:	Vorschlag zur Höhe von Abminderungsfaktoren ζ_{TP} zur Berücksichtigung der Vorgeschichte eines Regenereignisses	367
Tabelle A - 21:	Anfangsverlusthöhen durchlässig befestigter Flächentypen	369

TEIL A

GRUNDLAGEN

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Problemstellung

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, um eine gleichermaßen sachgerechte wie wirtschaftliche Dimensionierung der einzelnen Entwässerungsanlagen sicherzustellen.

Bei konventionellen Berechnungsverfahren wird der Abflussbeitrag der an das Entwässerungssystem angeschlossenen Flächen vereinfachend mittels flächenspezifischer Abflussbeiwerte bestimmt. Die unterschiedlichen Abflussbeiwerte können je nach Anwendungsfall und Flächentyp den geltenden technischen Regelwerken entnommen werden. Darüber hinaus werden heute neben den konventionellen Berechnungsmethoden vielfach Abflussmodelle in der Entwässerungsplanung eingesetzt, welche das Niederschlagsabflussverhalten der Oberflächenbeläge mittels Einzelverlustansätzen erfassen. Diese Ansätze haben sich für die weitgehend wasserundurchlässigen Flächenbefestigungen bewährt.

Seit knapp zwei Jahrzehnten finden darüber hinaus versickerungsaktiv gestaltete Flächenbeläge eine breitere Anwendung, die ebenso wie konventionelle wasserdurchlässige und undurchlässige Flächenbeläge durch geeignete Berechnungsmethoden sachgerecht abgebildet werden müssen. Seitens der Baustoffindustrie sind diverse wasserdurchlässige Befestigungssysteme für verschiedene Anwendungsbereiche und mit unterschiedlich hohem Versickerungsvermögen entwickelt worden. Bei diesen Flächenbefestigungen ist – im Gegensatz zu den überwiegend undurchlässigen Belägen – die Komponente Versickerung von wesentlicher Bedeutung. Die bislang gängigen Berechnungsmethoden sind jedoch nicht in der Lage, den u.U. stark verzögerten Oberflächenabfluss, den Einfluss des Oberflächengefälles, die Speicherwirkung sowie die zeit- und intensitätsabhängige Versickerungsleistung solcher Flächenbeläge sachgerecht nachzubilden. Dies kann je nach Siedlungsstruktur, Flächencharakteristika und Betrachtungsgegenstand zu erheblichen Ungenauigkeiten und Unsicherheiten bei der Berechnung von Regenabflüssen und Abflussvolumina führen. Angesichts der Verfügbarkeit hoch detaillierter digitaler Einzugsgebietsdaten und gestiegener Rechnerkapazitäten werden dagegen heute sehr hohe Anforderungen an die Planungsgenauigkeit gestellt. Hierbei wird ein zunehmendes Augenmerk insbesondere auf unbefestigte sowie durchlässig befestigte Einzugsgebietsflächen gelegt, da sie einen bedeutenden Anteil der Siedlungsflächen ausmachen. Blieb früher insbesondere bei Kanalnetzberechnungen der Abfluss versickerungsaktiver Flächen, die v.a. bei Starkregenereignissen einen nicht zu vernachlässigenden Abflussbeitrag liefern können, aus Mangel an geeigneten Berechnungsansätzen oftmals gänzlich unberücksichtigt oder war zumindest mit großen Unsicherheiten behaftet, wird heute vom DWA-Regelwerk eine ausreichende Würdigung der Abflussanteile von nicht befestigten und durchlässig befestigten Flächen ausdrücklich gefordert (z.B. DWA-Regelwerke A-117, A-118, A-138 und M-153)¹. Eine generelle Vernachlässigung ist auch, zumal bei der Betrachtung von Regenereignissen geringer Auftretenswahrscheinlichkeiten, sachlich nicht zu rechtfertigen.

Allerdings können die gängigen Berechnungsmethoden diesem Anspruch nicht oder nur unzureichend gerecht werden. Bislang stehen dem Planer zur Quantifizierung des Oberflächenabflusses die im technischen Regelwerk und der Fachliteratur empfohlenen Abflussbeiwerte sowie die in den gängigen Abflussmodellen implementierten Berechnungsmethoden zur Verfügung.² Beide Methodiken weisen jedoch erhebliche Defizite insbesondere im Hinblick auf versickerungsfähige Flächenbefestigungen auf.³ Adäquate Hilfsmittel und Berechnungsgrundlagen, um Entwässerungsmaßnahmen und deren Auswirkungen zuverlässig berechnen und die Entwässerungsanlagen dimensionieren bzw. optimieren zu können, fehlen.

Insbesondere die Empfehlungen zu den Abflussbeiwerten vermögen weder das Spektrum der auf dem Markt befindlichen wasserdurchlässigen Flächentypen ausreichend widerzuspiegeln, noch die Abhängigkeit der Abflussbeiwerte von Niederschlagsgeschehen, Oberflächengefälle, Alter oder Verschmutzungsgrad angemessen zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für den Spitzenabflussbeiwert, für den bislang im technischen Regelwerk lediglich eine sehr grobe Unterteilung hinsichtlich Flächentyp und Flächenbeschaffenheit vorgenommen wird.

Darüber hinaus fehlen bislang Modellansätze zur Niederschlagsabflusssimulation, die in der Lage sind, das Abfluss- und Versickerungsverhalten wasserdurchlässiger Flächen realitätsnah nachzubilden. Die bislang angewandten Berechnungsan-

¹ Schmitt, T.G. und Illgen, M. (2001)

² ATV-DVWK-Merkblatt M 165; ATV-DVWK (2004)

³ ebenda
sätze wurden aus Mangel an Alternativen bereits vor Jahrzehnten aus der Gewässerhydrologie übernommen und auf versickerungsfähige Flächen in städtischen Einzugsgebieten übertragen; seither aber nicht nennenswert angepasst und verbessert. Das im Vergleich zu natürlichen Böden differierende Abfluss- und Versickerungsverhalten technischer hergestellter Flächenbefestigungen vermögen diese Ansätze nur in unzureichendem Maße wiederzugeben. Zudem liegen bis heute keine fundierten Empfehlungen zu geeigneten Parameterwerten für die diversen – mehr oder weniger versickerungsaktiven – Belagstypen, geschweige denn für unterschiedliche Flächencharakteristika vor.

Gleichwohl war die zunehmende Bedeutung wasserdurchlässiger Flächenbeläge in der Siedlungsplanung in den letzten rd. 15 Jahren Anlass für einzelne, weitgehend isoliert vollzogene messtechnische Untersuchungen zum Versickerungsvermögen verschiedener versickerungsaktiver Flächenbefestigungen. Der Schwerpunkt lag hierbei vorwiegend auf der Betrachtung besonders stark durchlässiger Flächenbeläge, die den Niederschlag nahezu vollständig aufzunehmen vermögen und z.T. gar eine eigenständige Versickerungsanlage darstellen können. Konventionelle, gering bis mäßig durchlässige Flächentypen wurden dagegen, obwohl sie einen weitaus höheren Anteil der bestehenden Siedlungsflächen ausmachen, bislang vielfach vernachlässigt.

Da die o.g. Messungen unter unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt, nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewertet und/oder unterschiedliche Flächenarten und Materialien betrachtet wurden, ist eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse nur bedingt möglich. De facto weisen die Untersuchungsergebnisse jedoch z.T. erhebliche Diskrepanzen sowohl untereinander als auch zu den ohnehin inkonsistenten Angaben der verschiedenen technischen Regelwerke auf. Darüber hinaus blieb der sukzessive Eintrag von Feinpartikeln, auch als Kolmation bezeichnet, der zu einer beträchtlichen Abnahme des Versickerungsvermögens mit zunehmender Standzeit führen kann, oftmals unberücksichtigt. Insgesamt ist damit ein erheblicher Kenntnismangel zum tatsächlichen Abfluss- und Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen zu konstatieren, insbesondere zum Versickerungsvermögen der besonders bedeutsamen gering bis mäßig durchlässigen Pflaster- und Plattenbelägen.

1.2 Zielsetzung und Schwerpunkt der Arbeit

Fundamentale Voraussetzungen für eine sachlich zutreffende und finanziell ausgewogene Planung von Entwässerungssystemen oder einzelner Entwässerungsanlagen sind zuverlässige Berechnungsgrundlagen sowie zutreffende Berechnungsmethoden. Diese sind jedoch im Hinblick auf die Quantifizierung des Oberflächenabflusses sowie der Versickerungsleistung durchlässig befestigter 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 quantitativen Abfluss- und Versickerungsverhalten wasserdurchlässiger Flächenbeläge abgeleitet und formuliert werden.

Damit lassen sich die primären Ziele der vorliegenden Forschungsarbeit wie folgt benennen:

- Gewinn vertiefter Kenntnisse zum Abfluss- und Versickerungsverhalten wasserdurchlässig befestigter Siedlungsflächen
- Ableitung gesicherter Abflussbeiwerte f
 ür unterschiedliche Befestigungstypen, verschiedene Randbedingungen und unterschiedliche Anwendungsbereiche
- (Weiter-)Entwicklung von urbanhydrologischen Modellansätzen zur Abflussbildung und Ausweisung flächenspezifischer Parameterwerte.

Die Forschungsarbeit soll damit einen Beitrag zur Schaffung zuverlässigerer Planungsgrundlagen sowie verbesserter Berechnungsmethoden zur Dimensionierung, Bewertung und Optimierung von Entwässerungsanlagen leisten. Dies stellt eine wichtige Voraussetzung zur Steigerung von Berechnungsgenauigkeit und Wirtschaftlichkeit entwässerungstechnischer Planungen dar.

Das Abfluss- und Versickerungsverhalten wasserdurchlässiger Flächenbeläge wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingehend auf phänomenologischer Ebene untersucht. Der prinzipielle Infiltrationsvorgang wird analysiert und beschrieben, Einflussfaktoren identifiziert und ihre Auswirkungen auf den Versickerungsprozess quantifiziert. Besonderes Augenmerk wird hierbei darauf gelegt, repräsentative und aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Daher wurde ein besonders breit ausgerichteter Forschungsansatz gewählt, der vielfältige wissenschaftliche Methoden kombiniert. Die Untersuchung umfasst sowohl die Betrachtung eines breiten Spektrums an Flächentypen als auch die Analyse der wesentlichen Einflussgrößen wie beispielsweise Oberflächengefälle, Kolmationsgrad, Niederschlagsbelastung und Flächenaufbau. Die Betrachtung erstreckt sich daher prinzipiell auf die gesamte Bandbreite durchlässig befestigter Siedlungsflächen; der Fokus liegt 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.

Die erzielten Untersuchungsergebnisse stellen die Basis zur Ausweisung bauartspezifischer Bemessungskennwerte und zur Entwicklung einer verbesserte Methodik zur Oberflächenabflussberechnung dar. 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 soll einerseits in der Lage sein, die maßgebenden physikalischen Prozesse und hydrologischen Phänomene mit einer höheren Genauigkeit als die bislang verfügbaren Berechnungsmethoden abzubilden. Andererseits soll er aber auch mit leicht bestimmbaren Berechnungsparametern arbeiten, mit möglichst geringem Rechenaufwand verbunden und problemlos in die gängigen urbanhydrologischen Softwarepakete implementierbar sein, um eine praktikable Anwendung zu ermöglichen.

1.3 Vorgehensweise

Im ersten Teil der Arbeit (Teil A) werden die Grundlagen und der Kenntnisstand zum Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen zusammen getragen, dokumentiert und bewertet. Eine systematische Gesamtanalyse der vorwiegend isoliert vollzogenen Messungen ist bislang nicht erfolgt, liefert aber wertvolle Erkenntnisse insbesondere über die Schwankungsbreite des Versickermögens wasserdurchlässiger Siedlungsflächen und stellt somit eine gute Grundlage für die umfassende Analyse des Versickerungsverhaltens dar, die in Teil B der Arbeit dargestellt ist.

Der bislang unzureichende Kenntnisstand zum Abflussbildungsprozess auf wasserdurchlässigen Flächenbelägen kann nur durch systematische messtechnische Untersuchungen substanziell verbessert werden. Der gewählte Forschungsansatz beinhaltet deshalb ein umfangreiches Messprogramm, das sowohl in-situ-Messungen an Bestandsflächen nach mehrjähriger Nutzung als auch zahlreiche Versuchsserien unter klar definierten Randbedingungen im Labor umfasst. Auf diese Weise sollen gleichermaßen realitätsnahe wie repräsentative Ergebnisse erzielt werden, die eine Analyse der wesentlichen Einflussfaktoren auf das Versickerungsvermögen ermöglichen. Die Analyse wird ergänzt durch die Auswertung von Abflussmessdaten verschiedener Pflasterbauweisen und durch numerische Strömungssimulationen. Die Untersuchungen an bestehenden Flächen zielen dabei in erster Linie darauf ab, 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 die sukzessive Nachverdichtung des Oberbaus. Darüber hinaus dienen die Ergebnisse der in-situ-Messungen zusammen mit den Ergebnissen früherer in der Fachliteratur dokumentierter Messreihen als Referenzwerte für die Laborversuche, um verschiedene Kolmationsgrade auch unter Laborbedingungen nachbilden und bewerten zu können. An verschiedenen Standorten wurde das Infiltrationsvermögen nach mehrjähriger Standzeit für diverse Belagstypen anhand von Infiltrometermessungen untersucht. Hierbei wurde zahlreiche Flächenbefestigungen mehrfach und an mehreren Stellen in der Örtlichkeit beprobt. Die eigenen Messungen wurden zudem mit den Messdaten früherer Untersuchungen in einem Datenpool zusammen gefasst und statistisch ausgewertet.

Den Kern des messtechnischen Untersuchungsprogramms bilden umfangreiche Beregnungsversuche an einem speziell hierfür entwickelten bzw. erweiterten Versuchstand. In rd. 140 Einzelversuchen wurden zahlreiche Belagstypen für verschiedene Beregnungslastfälle unter variierenden Randbedingungen untersucht. Gemessen wurden jeweils der Oberflächenabfluss, der Sickerabfluss aus der Tragschicht sowie die volumetrischen Wassergehalte in verschiedenen Horizonten der Tragschicht. Die Laborversuche wurden hierbei für vorwiegend konstante Beregnungsintensitäten zwischen 25 und 1.000 l/(s·ha) bei Flächenneigungen zwischen 2,5% und 7,5% durchgeführt. Der Gebrauchszustand wurde im Rahmen der Laborversuche durch das Einspülen von Quarzmehl nachgebildet.

Der Vorteil der Laborversuche besteht darin, einzelne Einflussfaktoren wie Niederschlagsbelastung, Gefälle, Kolmatierungsgrad, Aufbau, Materialeigenschaften und Untergrundverhältnisse systematisch untersuchen und analysieren zu können. Die Variation jeweils nur einer dieser Randbedingungen erlaubt eine eindeutige Zuordnung und Bewertung. Bei Messungen an Bestandsflächen ist dies i.d.R. nicht möglich. So kann bspw. der Einfluss des Oberflächengefälles an Beregnungsversuchen des gleichen Belages bei Gefällestufen von 2,5%, 5,0% und 7,5% jeweils für verschiedene Beregnungsintensitäten und Kolmatierungsgrade ermittelt 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.

In Ergänzung zu den Laborversuchen wurde der Lysimeteraufbau mit Hilfe des numerischen Strömungsmodells HYDRUS-2D nachgebildet, anhand der Messdaten kalibriert und auf weitere Belastungsszenarien und Randbedingen angewandt. Auf der Grundlage der Messergebnisse sowie der daraus gefolgerten Erkenntnisse wird zum Abschluss des experimentellen Teils der Arbeit das Versickerungsverhalten allgemein charakterisiert und bauartspezifische Kennwerte abgeleitet.

Der dritte und letzte Teil der Arbeit (Teil C) widmet sich der urbanhydrologischen Quantifizierung des Versickerungsverhaltens. Darin werden Empfehlungen für die stadthydrologische Praxis formuliert und anhand von urbanhydrologischen Vergleichsrechnungen überprüft. Die Anwendungsempfehlungen umfassen Abflussbeiwerte zur konventionellen Abflussberechnung sowie Parameterwerte zur urbanhydrologischen Modellanwendung. Darüber hinaus wird ein urbanhydrologischer Modellbaustein zur besseren modelltechnischen Erfassung des spezifischen Versickerungsverhaltens durchlässig befestigter Siedlungsflächen konzipiert und vorgestellt.

2 Grundlagen und Kenntnisstand

2.1 Flächenbefestigungen in Siedlungsgebieten

In Deutschland nehmen Siedlungsflächen derzeit mit rd. 46.000 km² knapp 13% der Gesamtfläche ein, wobei die durchschnittliche tägliche Zunahme in den letzten Jahren rd. 120 ha/Tag beträgt⁴. Zur Befestigung dieser Siedlungsflächen werden dabei heute eine Vielzahl unterschiedlicher Baustoffe und Techniken eingesetzt, um die gewünschte Nutzung der jeweiligen Fläche sicherzustellen.

Mit der Befestigung einher geht die Veränderung des Wasserhaushaltes dieser Flächen. Je geringer die Wasserdurchlässigkeit einer Flächenbefestigung ist, umso größer ist der bei Regen resultierende Oberflächenabfluss von dieser Fläche. Beschaffenheit und Charakteristika einer Flächenbefestigung spielen somit eine große Rolle zur Quantifizierung des jeweiligen Abflussbeitrages einer Fläche.

Als praktisch wasserundurchlässig sind Befestigungen einzustufen, die vollflächig aus gefügedichten Materialien wie Metall, Glas, Gestein, Faserzement, Beton oder Asphalt aufgebaut sind. Bei diesen Befestigungstypen findet quasi keinerlei Versickerung von Regenwasser in den Untergrund statt. Dennoch sind diese Flächen nicht zwingend vollständig abflusswirksam. Je nach Gefälle, Ebenheit und Rauhigkeit der Oberfläche verbleibt ein Anteil des Niederschlages auf der Fläche und verdunstet in die Atmosphäre. Insbesondere bei schwächeren Regenereignissen, aber auch bezogen auf die Jahresniederschlagshöhe liegt der oberflächig abfließende Anteil des Niederschlages deutlich unter 100%.

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 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 in der Regel nur bei Flächenbefestigungen, bei denen die vollständige

Statistisches Bundesamt (2006); S. 387ff.
 Anmerkung: Der Anteil der Verkehrsflächen an den Siedlungsflächen beträgt derzeit rd. 38%. Die Siedlungsflächen beinhalten hierbei auch unbefestigte Freiflächen.

Oberfläche versickerungsfähig ausgebildet ist, von porösen Flächenbefestigungen.

Eine Übersicht gängiger Arten versickerungsfähig ausgebildeter Flächenbefestigungen ist in nachstehender Tabelle 1 zusammen gestellt. 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 oder Sickeröffnungen ⁵	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

Bezogen auf wasserdurchlässig befestigte Siedlungsflächen machen in Deutschland Pflaster- und Plattenbauweisen den weitaus größten Flächenanteil aus. Pflasterflächen sind in Siedlungsgebieten allgegenwärtig und auf quasi jedem privaten oder öffentlichen Grundstück zu finden. Nach Ferguson⁶ nehmen Pflasterungen in den USA doppelt so viel Fläche ein wie Gebäude und bilden zwei Drittel der befestigten Siedlungsfläche.

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

⁵ 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.

⁶ Ferguson, B. K. (2005)

Außenbereichsflächen im kommunalen, industriellen und privaten Gebäudeumfeld.⁷ Pflasterbauweisen einschließlich Plattenbelägen haben dort einen Flächenanteil von bis zu 70%, wovon rd. 90% unter Verwendung von Betonprodukten ausgeführt werden⁸.

Pflastersysteme, die eine gezielte Versickerung von Regenwasser ermöglichen sollen, werden seit Ende der 1960er, Anfang der 1970er Jahre entwickelt⁹. Größere Aufmerksamkeit erlangten Sie jedoch erst seit Ende der 1980er Jahre. Obwohl die Verwendung spezieller Sickerpflastersysteme seither erheblich gestiegen ist, ist ihr Marktanteil im Vergleich zu konventionellem Funktionspflaster sowie zu Gestaltungspflaster immer noch vergleichsweise gering¹⁰. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, insbesondere das Versickerungsvermögen herkömmlicher Pflasterbauweisen mit geringem Fugenanteil und entsprechend limitiertem Versickerungsvermögen eingehend zu untersuchen.

Gebäude- und Freiflächen nehmen in Deutschland mit rd. 52% den größten Teil der Siedlungsfläche ein (rd. 24.000 km²). Der Anteil der Verkehrsflächen beträgt derzeit etwa 38% (rd. 18.000 km²).¹¹ Die beiden Flächenkategorien umfassen hierbei sowohl technisch befestigte oder überbaute als auch unbefestigte Flächenanteile. Weder über die Größe der insgesamt befestigten Siedlungsfläche noch über die expliziten Anteile der verschiedenen wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen an der gesamten Siedlungsfläche der Bundesrepublik existieren hingegen amtlichen Statistiken. Diesbezüglich liegen nur vereinzelte Erhebungen aus verschiedenen Großstädten vor, die nur einen exemplarischen Charakter haben können.¹² Gleichwohl wird der mittlere Versiegelungsgrad der Siedlungsfläche in Deutschland vom Statistischen Bundesamt auf 50% geschätzt.

Heber et al.¹³ haben bspw. für die Stadt Dresden die in Abbildung 1 dargestellten Anteile unterschiedlicher Befestigungsarten an der befestigten Siedlungsfläche ermittelt. Die Grafik zeigt die für unterschiedliche Siedlungsstrukturtypen erhobenen Flächenanteile der Bebauung, von wasserundurchlässigen Befestigungen, von Pflaster- und Plattenflächen sowie von wassergebundenen Flächen in der Gegenüberstellung.

Danach entfallen je nach betrachtetem Siedlungsstrukturtyp 34%-53% der

⁷ Ulonska, D. (2005); S. 4

⁸ SLG (2004)

⁹ Borgwardt, S., Gerlach, A., Köhler, M. (2000); S. 72f.

¹⁰ Borgwardt, S., Gerlach A.; Köhler, M. (2001); S. 9.

¹¹ Statistisches Bundesamt (2006)

¹² ebenda

¹³ Herber, B. et al. (1993) und (1996)

befestigten Siedlungsfläche auf Gebäudegrundflächen. Pflaster- und Plattenbauweisen nehmen beachtliche 23%-32% der befestigten Siedlungsfläche ein. Obgleich die Zahlen nicht ohne Weiteres auf andere Stadtgebiete übertragbar sind, zeigen sie doch den nennenswerten Anteil der Pflaster- und Plattenbauweisen an der befestigten Siedlungsfläche auf.





Die umfassendste bekannte Detailkartierung zur Flächenbefestigung von Siedlungsgebieten wurde von Münchow Mitte der 90er Jahre für Stadtgebiete von Leipzig und Dresden durchgeführt. Sie verwendet dabei einen Kartierungsschlüssel, der auf der Arbeit von Berlekamp und Pranzas¹⁵ basiert, differenziert bei ihren Erhebungen jedoch weitaus stärker bezüglich der Art der Flächenbefestigungen. Ausgewählte Ergebnisse der Flächenerhebung für das Stadtgebiet von Leipzig sind in Abbildung 2 zusammen gestellt.

Das Diagrammensemble zeigt exemplarisch für acht verschiedene Siedlungsstrukturtypen jeweils die mittleren Flächenanteile unterschiedlicher Deckbeläge an den befestigten Grundstücksfreiflächen.¹⁶ Den ausgewiesenen Kennwerten liegen hierbei Detailkartierungen an 55 abgegrenzten Teilbereichen des Stadtgebietes von Leipzig zu Grunde (maximal 11 je Strukturtyp).

Die Grafiken verdeutlichen, dass die Flächenanteile der verschiedenen Belagsarten zwischen Gebieten unterschiedlicher Siedlungsstruktur erheblich variieren können. Dennoch bilden konventionelle Pflaster- und Plattenbeläge vielfach einen

¹⁴ eigene Darstellung nach Herber, B. et al. (1993) und (1996)

¹⁵ Berlekamp, L.-R. und Pranzas, N. (1992)

¹⁶ Gebäudegrundflächen und Verkehrsflächen sind hier nicht enthalten.

Großteil der befestigten Grundstücksfreiflächen und übersteigen bei den meisten Siedlungsstrukturtypen sogar den Flächenanteil wasserundurchlässiger Decken aus Asphalt o.ä.. Ausnahmen bilden hier lediglich gewerblich oder industriell genutzte Flächen sowie ehemalige Dorfkerne. Kleinpflaster und Mosaikpflaster nehmen nur bei einigen wenigen Strukturtypen nennenswerte Flächenanteile ein. Sickerpflasterbeläge spielen bei allen betrachteten Siedlungsstrukturtypen nur eine untergeordnete Rolle und weisen Flächenanteile von deutlich unter 5% auf.



Abbildung 2: Prozentuale Anteile unterschiedlicher Befestigungstypen an den befestigten Grundstücksfreiflächen der Stadt Leipzig¹⁷

Die Erhebungen von Münchow und Heber et al. verdeutlichen, dass große Flächenanteile unserer Siedlungsgebiete mit Pflaster- und Plattenbelägen befestigt sind. Dabei dominieren immer noch konventionelle, in der Regel fugenarm verlegte Bauweisen aus funktionalformatigen Pflastersteinen und Platten. Die beachtlichen Flächenanteile dieser Befestigungsarten unterstreichen damit ihre

¹⁷ eigene Darstellung nach Münchow, B. (1999) und Breuste, J. et al. (1996)

hohe Relevanz bei der Berechnung des niederschlagsbedingten Abflussaufkommens in Siedlungsgebieten.

2.2 Bodenphysikalische Grundlagen

Die Versickerung von Regenwasser durch wasserdurchlässige Flächenbefestigungen hindurch erfolgt im Wesentlichen infolge der grobkörnigen Struktur eines porösen, wasser- und luftdurchlässigen Mediums. Dieses Medium können körnige Mineralstoffe einer Fugenfüllung, stark verdichte Mineralstoffgemische des Oberbaus von Pflasterbauweisen oder künstlich hergestellte haufwerkporige Elemente aus Beton, Kunststoff oder Asphalt bilden. Über die detaillierten hydraulischen Prozesse bei diesen technisch hergestellten Flächenbefestigungen ist jedoch bislang wenig bekannt.

Weitaus besser bekannt sind dagegen die grundsätzlichen hydraulischen Prozesse natürlicher oder technisch bearbeiteter Böden. Im Analogieschluss bedient man sich daher gerne dieser Kenntnisse und überträgt sie auf wasserdurchlässige Flächenkonstruktionen oder ähnliche durchströmte Anlagen der Wasserwirtschaft, um diese besser analysieren und bewerten zu können.

2.2.1 Feststoffmatrix und Porengefüge

Ein poröses Medium wie bspw. ein Boden bildet ein Drei-Phasen-System mit einer festen Matrix, einer flüssigen Bodenlösung sowie der gasförmigen Phase Luft. Die feste Phase bildet eine poröse Struktur, deren Masse nicht raumfüllend ist. Der Porenraum der Matrix kann daher zu unterschiedlichen Anteilen von der flüssigen und der gasförmigen Phase ausgefüllt werden.

Neben der Korngrößenverteilung und der Lagerungsdichte eines Bodens bestimmt vor allem die räumliche Anordnung von fester Phase und Porenstruktur die Wasserbewegung. Bei natürlichen Böden bezeichnet man die räumliche Anordnung von Feststoffphase und Porenstruktur als Bodengefüge.¹⁸

Die Porengrößenverteilung ist ein bestimmender Faktor für das Ausmaß der Speicherung des Wassers in der Bodenmatrix sowie für die Dynamik des Wassertransports und beeinflusst somit den Wasserhaushalt eines Bodens bzw. eines porösen Mediums. Dabei kann prinzipiell zwischen Primär- und Sekundärgefüge unterschieden werden. Primärporen stellen das körnungsbedingte Porengefüge dar, bei dem die festen Teilchen (Primärpartikel) nebeneinander gelagert sind und entsprechende Zwischenräume bilden – ähnlich einer Lagerung von Kugeln in einem Behälter. Die Primärporenverteilung korreliert hierbei sehr eng mit der Partikelgrößenverteilung.¹⁹

¹⁸ Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992); S. 140ff

¹⁹ Flühler, H. und Roth, K. (2003)

Als Sekundärporen oder Makroporen bezeichnet man das Porengefüge, das aus Schwund- und Schrumpfrissen, Wurzelkanälen oder aus Röhren und Gängen bodenbewohnender Tiere entsteht. Sekundärporen sind kontinuierlicher als Primärporen, besitzen größere und weniger stark variierende Durchmesser (>60 µm), sind zudem weniger gewunden und verlaufen meist in vertikaler Richtung. Sie stellen daher bei der Infiltration bevorzugte Fließwege dar. Für Mineralstoffgemische ohne Bindemittel spielen Sekundärporen – nach bisherigem Kenntnisstand – jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Aufgrund der größeren Korndurchmesser sind bei Mineralstoffgemischen des Straßen- und Wegebaus zudem die Primärporen größer als bspw. bei natürlichen Böden, was sich in einer vergleichsweise hohen Wasserdurchlässigkeit ausdrückt.²⁰

Die Porengrößenverteilung stellt, wie auch die Körnung, ein Kontinuum dar, das in konventionell festgelegte Bereiche unterteilt wird.²¹ Mit den Grenzen dieser Porengrößenbereiche sind die in Tabelle 2 aufgeführten Kennwerte des Wasserhaushaltes im Boden verbunden.

Charakteristika	Porengrößenbereich							
	Feinporen	Mittelporen	enge Grobporen	weite Grobporen				
Porendurchmesser [µm]	< 0,2	0,2 ÷ 10	0,2 ÷ 10 10 ÷ 50					
Matrixpotenzial [hPa]	< -15.000	-15.000 ÷ -300	-15.000 ÷ -300 -300 ÷ -60					
pF-Wert [cm WS]	> 4,2	4,2÷2,5	2,5 ÷ 1,8	< 1,8				
Bodenwasser	nicht pflanzen- verfügbares Haftwasser	pflanzenverfügbares Haftwasser	langsam bewegliches Sickerwasser	schnell bewegliches Sickerwasser				
Speicherkapazität	Totwasser	nutzbare F	Luft- bzw. Speicher- kapazität für Grund- u. Stauwasser					
		Feldkapazität						

Tabelle 2:Beziehung zwischen Porengrößen und Matrixpotenzial sowie daraus
abgeleitete Wasserbindungsformen²²

Primärporen werden nach der Intensität der Wasserbindung in den Poren eingeteilt in Feinporen, Mittelporen und Grobporen. Grobporen sind für Wurzeln und Mikroorganismen zugänglich. Sie binden Wasser nur schwach, d.h. in solchen

²⁰ Kellermann, C. (2003)

²¹ Flühler, H. und Roth, K. (2003)

²² nach Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1994); S. 296.

Poren bewegt sich das Wasser vergleichsweise leicht und dränt unter dem Einfluss der Schwerkraft rasch. In Mittelporen und Feinporen sind dagegen Kapillarkräfte wirksam, die das Wasser stärker an die Matrix binden. Dabei ist die Stärke der Bindung umgekehrt proportional zum Porendurchmesser. In Poren mit Durchmessern < 10 µm sind die Kapillarkräfte stark genug, um das Wasser für längere Zeiträume entgegen der Schwerkraft im Boden zu halten. Das in den Mittelporen (\emptyset 0,2 - 10 µm) gebundene Wasser kann durch Wurzeln der Bodenmatrix entzogen werden. Feinporen (\emptyset < 0,2 µm) dagegen binden das Wasser so stark, dass es für die meisten Pflanzen nicht mehr verfügbar ist. Sie sind, abgesehen von der unmittelbaren Bodenoberfläche, somit unter humiden Klimabedingungen stets wasserführend.

Mineralische Baustoffgemische wie sie im Straßenbau vorwiegend verwendet werden, sind jedoch im Vergleich zu natürlichen Böden durch einen sehr hohen Anteil an Grobporen und nur sehr geringe Anteile an Mittel- und Feinporen gekennzeichnet. Für Sande, Splitte und Schottermaterialien liegt der Anteil der weiten Grobporen am Gesamtporenvolumen in der Größenordnung von 90-95%, wobei besonders große Porendurchmesser > 400 µm dominieren²³. Entsprechend ist der Anteil kapillar gebundenen Wassers bei diesen Materialen sehr gering; ein kapillarer Aufstieg findet in der Regel nicht statt.

Wie in Tabelle 2 aufgeführt sinkt das Matrixpotenzial als Maß für die Bindungsstärke, mit der die Bodenmatrix das Wasser im Bodenkörper hält, mit wachsender Porengröße deutlich ab. Das Matrixpotenzial gibt hierbei die Saugspannung an, die aus der Kapillarität und der Benetzungsfähigkeit des Bodens sowie der Oberflächenspannung des Wassers resultiert und mit der die flüssige Phase entgegen der Schwerkraft an die Einzelteilchen der festen Phase gebunden wird. Hierbei wird das Matrixpotenzial in der Regel als Sog, also als negativer Druck, mit entsprechend negativem Vorzeichen oder in Analogie zum pH-Wert als negativer dekadischer Logarithmus der Bodenwasserspannung (pF-Wert) angegeben.

2.2.2 Wechselwirkungen zwischen Fest- und Flüssigphase

Zwischen der Wasserspannung und der in der Matrix gebundenen Wassermenge, der Bodenfeuchte, besteht eine charakteristische Beziehung, die als Wasserspannungs- oder pF-Kurve den Wasserhaushalt des Bodens beschreibt. Je trockener der Boden ist, desto größer ist die Saugspannung. Je weniger Wasser also eine Bodenmatrix aufweist, umso höher wird die hydrostatische Kraft, die das Wasser

²³ Fach, S. (2006); S. 146

in der festen Phase hält und am Abfließen hindert. Umgekehrt sinkt diese Bindungsstärke zwischen Fest- und Flüssig-Phase mit zunehmendem Wassergehalt, so dass die Wasserleitfähigkeit mit zunehmender Bodenfeuchte ebenfalls und z.T. deutlich ansteigt. Der Verlauf der Wassergehalts-Saugspannungs-Kurve ist hierbei je nach Bodenart bzw. Medium unterschiedlich. In Abbildung 3 sind typische Saugspannungsverläufe von Sand-, Schluff- und Tonböden den Verläufen verschiedener mineralischer Baustoffgemische gegenübergestellt²⁴.



Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad für verschiedene Böden und Mineralstoffgemische

Der unterschiedliche Kurvenverlauf für die verschiedenen Bodentypen resultiert in erster Linie aus den unterschiedlichen Porengrößenverteilungen (s.o.). Je grobkörniger die Matrix ist, umso höher ist der Anteil an weiten Grobporen und umso leichter kann der Matrix Wasser entzogen werden, was sich im Bereich von Saugspannungen unter 60 hPa (bzw. 60 cm WS) in einem steilen Abfallen des Wassersättigungsgrades ausdrückt. Bei feinkörnigeren Böden sind die Mittelporen (pF 2,5 – 4,2) sowie die Feinporen (pF > 4,2) in deutlich höherem Maße an der

²⁴ abgeleitet und idealisiert nach Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992) sowie Fach, S. (2006)

Wasserspeicherung beteiligt. Entsprechend sinkt hier der Wassergehalt bei Entleerung der weiten und engen Grobporen in deutlich kleinerem Maße ab.

Die Abbildung verdeutlicht darüber hinaus, dass bei gleichem Wassergehalt bzw. Wassersättigungsgrad die Bindungsstärke des Wassers mit zunehmendem Feinporenanteil eines Bodens steigt (Schotter < Splitt < Sand < Schluff < Ton). Die unterschiedlichen Saugspannungen beruhen hierbei auf einer Zunahme der adsorbierenden Oberfläche und einer Abnahme des Porendurchmessers bei zunehmendem Anteil an Feinkorn bzw. Feinporen²⁵.

Die Beziehung zwischen Wassergehalt und Saugspannung wird jedoch nicht nur durch die Körnung und das Gefüge der Feststoffmatrix beeinflusst, sondern auch von der Richtung der Wassergehaltsänderung²⁶. So ergeben sich für die Be- und Entwässerung einer Bodenmatrix unterschiedliche Wasserspannungsverläufe. Vielfach ist bei einem Drainagevorgang bei gleicher Saugspannung der Wassergehalt höher als beim Benetzungsvorgang. In Abbildung 4 ist dieser als Hysterese bezeichnete Effekt am Beispiel der Wasserleitfähigkeits-Kurve eines gesiebten Sandes, wie er als Bettungs- und Fugenmaterial von Pflasterflächen häufig Anwendung findet, dargestellt.



Abbildung 4: Beziehung zwischen Wasserleitfähigkeit und Saugspannung bei einem gesiebten Sand mit Körnung 0/2 mm im Be- und Entwässerungsfall (Hysterese)²⁷

²⁵ Spürbar wird dies bspw. dadurch, dass sich bei einem bestimmten Wassergehalt (z.B. von 20%) ein Sandboden nass, ein Schluff bei gleichem Wassergehalt jedoch lediglich feucht und ein Ton sogar trocken anfühlt.

²⁶ Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992)

²⁷ nach Flöter, O. (2006); S. 123

Der Hystereseeffekt resultiert in erster Linie aus der bei Be- und Entwässerung gegensätzlichen Wirkung von Porenengpässen und Luftinklusionen. Wird der Porenraum entleert, kann in einer Engstelle des Porengefüges der zwischen den Teilchen kapillar haftende Wassermeniskus nachströmendes Wasser am Abfließen hindern. Größere Porenräume, die von kleineren Poren umgeben sind, können sich dann erst entleeren, wenn die Saugspannung auch die kleineren Poren zu entwässern vermag. Umgekehrt verhindern größere Poren die Benetzung angrenzender kleinerer Poren bis die Saugspannung erreicht ist, die auch die großen Poren benetzen und füllen kann. Vor allem in Sandböden aber auch bei sandigen Mineralstoffgemischen im Straßenbau spielt die Hysterese eine Rolle, während in feinkörnigen Substraten wie Lehm keine Relevanz festzustellen ist.

2.2.3 Hydraulische Leitfähigkeit der Bodenmatrix

Die Wasserleitfähigkeit, die zusammen mit dem antreibenden Potenzialgefälle die Wasserbewegung in einem porösen Medium bestimmt, ist in hohem Maße vom Durchmesser der leitenden Poren abhängig. Dies gilt insbesondere auch für den Fall, dass sich der leitende Querschnitt infolge teilgefüllter Porenräume reduziert.

Bei Sättigung der Poren erreicht die Wasserleitfähigkeit ihr Maximum. Dagegen ist die Wasserleitfähigkeit herabgesetzt, wenn ein Teil der Poren Luft enthält und entsprechend nicht am Wassertransport teilnehmen kann. Die Entwässerung des Bodenkörpers bspw. durch Verdunstung mindert folglich die Wasserleitfähigkeit. Da die weitesten Poren, die bei Wassersättigung den größten Anteil am Wassertransport übernehmen, in der Regel als erste entwässert werden, nimmt die Wasserleitfähigkeit mit sinkendem Wassergehalt ab. Dabei sinkt die Wasserleitfähigkeit aufgrund der unterschiedlichen Porengrößenverteilung bei grobkörnigen und grobporenreichen Matrices bereits bei niedrigen Wasserspannungen sehr rasch, während sie bei feinkörnigeren, mittel- und feinporenreichen Matrices erst bei höheren Wasserspannungen und in geringerem Maß abnimmt. Dieser Sachverhalt ist Abbildung 5 veranschaulicht.

Die Abbildung zeigt den Verlauf der Wasserleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Saugspannung für drei unterschiedliche Böden. Die bei Sättigung sehr hohe Wasserleitfähigkeit des Sandbodens reduziert sich bis zu einer Saugspannung von 300 hPa infolge der Entwässerung der weiten und engen Grobporen, die hier einen Großteil des Porenraumes ausmachen, auf einen Wert von $5 \cdot 10^{-6}$ m/s und unterschreitet dabei die Durchlässigkeit des Schluffbodens, der einen geringeren Anteil an Grobporen aufweist. Die relativ hohe Wasserleitfähigkeit des Tonbodens in gesättigtem Zustand ist die Folge des Vorhandenseins von Sekundärporen, die aber sehr grob sind und daher schon bei Wasserspannungswerten < 10 hPa entleert werden. Bei starker Austrocknung ist die Wasserleitfähigkeit des Tonbo-



dens größer als die aller anderen Böden, weil er in diesem Zustand wegen des noch relativ hohen Wassergehaltes die größten Fließquerschnitte hat.

Abbildung 5: Wasserleitfähigkeit am Beispiel dreier verschiedener Bodenmatrices in Abhängigkeit von der Wasserspannung²⁸

Dieses Beispiel verdeutlicht die ausgeprägte Korrelation zwischen der Wasserleitfähigkeit und dem Wassergehalt sowie der Porenstruktur einer Bodenmatrix. Dabei wird die hydraulische Leitfähigkeit nicht nur durch das Porenvolumen und die Porengrößenverteilung bestimmt, sondern vor allem durch die Kontinuität, Tortuosität und Vernetzung der Poren. Die Form der Leitungsbahnen, charakterisiert durch Engpässe und Krümmungen (sog. Tortuosität), beeinflusst in hohem Maße die Wasserleitfähigkeit, was sich in einer hohen Streubreite bei Messungen niederschlägt.

In Bezug auf die hydraulische Leitfähigkeit mineralischer Baustoffgemische und ihre Abhängigkeit vom Wassergehalt ist bislang wenig bekannt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auch für grobkörnige Schotter-, Splitt- und Sandaggregate von wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen die zuvor beschriebenen Phänomene zutreffen, wobei sich der hohe Anteil an Grobporen bei Teilsättigung entsprechend niederschlägt. Flöter berichtet beispielsweise, dass die Abnahme der Wasserleitfähigkeit sehr ausgeprägt sein kann, wenn bei sandgefüllten Fugen eines Pflasterbelages durch größere Körner relativ große Hohlräume entstehen

²⁸ nach Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992)

und Sickerwasser bei Teilsättigung um die luftgefüllten Hohlräume herum fließen muss. Die hydraulische Leitfähigkeit kann dann infolge des deutlich verringerten Fließquerschnittes erheblich herabgesetzt werden. Bei geringen Sättigungsgraden und pF-Werten > 1,8 (bzw. entsprechenden Saugspannungen > 60 hPa) können sich Wasserleitfähigkeiten deutlich unter 10⁻⁷ m/s ergeben (siehe auch Abbildung 4).²⁹ Dies hat zur Folge, dass bei schwächeren Niederschlagsbelastungen mitunter nur vergleichsweise wenig Wasser versickern kann, während bei höheren Regenintensitäten mehr Wasser durch die Bodenmatrix abgeführt werden kann (dabei auch begünstigst durch die höheren Fallgeschwindigkeiten der Regentropfen). Für Schottertragschichten von Pflasterflächen gilt dies analog, wobei die hohe Verdichtung bei der Herstellung einem hohen Anteil an weiten Grobporen entgegenwirkt und sich in einer weniger ausgeprägten Abnahme der Wasserleitfähigkeit bei sinkendem Wassergehalt und entsprechend ansteigender Saugspannung niederschlägt.

2.2.4 Wasserbewegung in einem porösen Medium

Die Wasserbewegung in einem porösen Medium wird angetrieben durch Potenzialdifferenzen, die sich als Folge von Wasserzufuhr oder Wasserabgabe (z.B. Niederschlag und Verdunstung) ergeben. Nur selten befindet sich das Wasser in einem Bodenkörper in einem statischen Gleichgewicht; vielmehr kommt es allein schon infolge atmosphärischer Einflüsse fortlaufend zu einer ausgleichenden Wasserbewegung vom höheren hin zum niedrigeren Potenzial. Die Wasserbewegung ist hierbei abhängig von den Eigenschaften des durchströmten Materials, insbesondere von der Wasserleitfähigkeit, die wiederum von Porengefüge und Wassergehalt bestimmt wird.

Die einfachste Form, in der die Wasserbewegung in einem Boden bzw. einem porösen Medium mathematisch beschrieben werden kann, ist die nach dem französischen Ingenieur Darcy benannte stationäre Strömungsgleichung von 1856:

$$q = -k_f \cdot \frac{\delta \psi}{\delta z}$$

mit q: Wassermenge, die je Zeiteinheit den Fließquerschnitt durchströmt

- k_f: hydraulische Leitfähigkeit
- $\psi{:}$ $% \psi_{H}$ antreibendes Potenzial; hier das hydraulische Potenzial ψ_{H}
- z: Fließstrecke

²⁹ nach Flöter, O. (2006); S. 117 ff.

Für die Wasserbewegung im ungesättigten Bereich spielt jedoch der Einfluss von Niederschlag, Evaporation, pflanzlicher Wasseraufnahme, kapillarem Aufstieg und Versickerung eine wichtige Rolle. Da diese Größen zeitvariabel sind, wird die Bodenwasserbewegung besser durch eine instationäre Strömung beschrieben.

Die Strömungsgleichung von Richards (1931) beschreibt den Zusammenhang zwischen der Veränderung des Wassergehaltes eines Bodenvolumens in einer Zeiteinheit und dem Fluss, der durch einen Potenzialgradienten hervorgerufen wird. An dieser Stelle wird allerdings lediglich die eindimensionale Formulierung der Gleichung (mit Strömung in vertikaler Richtung) beschrieben.

Die Gleichung basiert darauf, dass die zeitliche Änderung des Wassergehaltes gleich der Änderung des Flusses in Fließrichtung ist (Kontinuitätsgleichung):

$$\begin{split} \frac{\delta \Theta}{\delta t} &= -\frac{\delta q}{\delta z} \\ \text{mit } \theta : & \text{Wassergehalt} \\ \text{t:} & \text{Zeit} \end{split}$$

Der Fluss q wird auch bei Richards durch die Darcy-Gleichung beschrieben bzw. durch die erweiterte Formulierung nach Darcy-Buckingham (1907). Die Kombination aus Fließgleichung und Kontinuitätsgleichung ergibt schließlich:

$$\frac{\delta \Theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \Biggl[k \bigl(\psi_m \bigr) \cdot \left(\frac{\delta \psi_m}{\delta z} - 1 \right) \Biggr]$$

mit δθ/δt: zeitliche Änderung des Wassergehaltes
 k(ψ_m): hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial
 δψ_m/δz: Änderung des Matrixpotenzials in Fließrichtung

Die Richards-Gleichung ist Grundlage vieler Modelle zur detaillierten Berechnung von Strömungsvorgängen in der ungesättigten Bodenzone. Ein großer Vorteil liegt in der vergleichsweise einfachen Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit und der Wasserspannungskurve (pF-Kurve) als notwendige Parameter für die Modellierung. Die Darcy-Gleichung ist dagegen meist Grundlage von Modellen zur Berechnung der Wasserbewegung in der gesättigten Zone.

2.2.5 Infiltrationsvorgang

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ist insbesondere die Infiltration, also das Eindringen von Regenwasser in einen Bodenkörper, von Interesse. Die Infiltration ist eine instationäre, vorwiegend eindimensionale ungesättigte Wasserbewegung, die einsetzt, wenn das Schwerkraft induzierte Gravitationspotenzial ψ_g das Matrixpotenzial ψ_m an der Oberfläche betragsmäßig übersteigt.³⁰ Der Vorgang kann hierbei durch Beregnung oder Überstauung der Oberfläche in Gang gesetzt werden. Die Wasserzufuhr und die Füllung der obersten Poren bewirken, dass das negative Matrixpotenzial ansteigt (bzw. betragsmäßig abnimmt). Da das Gravitationspotenzial konstant bleibt, stellt sich eine entsprechende Potentialdifferenz ein. Dieses sog. hydraulische Potenzial ($\psi_H = \psi_m + \psi_g \neq 0$) hat zur Folge, dass – im Bestreben nach einem Gleichgewichtzustand ($\psi_H = 0$) – überschüssiges Wassers dem hydraulischen Gradienten folgend nach unten abgeführt wird.

Der Verlauf der Infiltration kann durch die zeitvariable Infiltrationsrate, welche die je Zeiteinheit einsickernde Wassermenge angibt, beschrieben werden. Maßgebend für den Verlauf der Infiltration sind bei natürlichen Böden vor allem das Ausmaß der Verschlämmung der Oberfläche (Gefügestabilität), die Variabilität der Wasserleitfähigkeit bei wechselndem Wassergehalt, das Porenvolumen sowie der Wassergehalt zu Beginn des Versickerungsprozesses.³¹ Bei langanhaltenden Infiltrationsversuchen ergibt sich typischerweise der nachstehend schematisierte Verlauf (Abbildung 6).

Da zu Beginn eines Niederschlages zunächst die Grob- und Makroporen gefüllt werden ohne dass das gespeicherte Wasser direkt nach unten weitergegeben wird, ergeben sich oftmals hohe Anfangsinfiltrationsraten, welche die gesättigte Wasserleitfähigkeit übersteigen können. Während dieses Füllvorgangs nimmt die Versickerungsrate rasch ab (Phase A) und es stellt sich eine nahezu konstante Versickerungsrate ein, die oftmals als Endinfiltrationsrate bezeichnet wird (Phase B). Aufgrund eingeschlossener Luftbläschen im Porenraum liegt zu diesem Zeitpunkt noch kein vollständiger Sättigungszustand vor, so dass die Infiltrationsrate geringer als die maximal mögliche Infiltrationsrate (= Leitfähigkeit bei Sättigung) ist. Erst nach mehreren Stunden kann die Luft nahezu vollständig entweichen oder sich im Bodenwasser lösen, wodurch die Infiltrationsrate wieder ansteigt (Phase C) bis die gesättigte Leitfähigkeit erreicht wird (Phase D). Infolge mikrobiellen Wachstums und der damit verbundenen Verringerung des Fließquerschnittes nimmt die Infiltrationsrate schließlich wieder ab (Phase E). Oftmals werden die drei letzten Prozessphasen allerdings nicht erreicht, da vorher bereits die Wasserzufuhr unterbrochen wird, bspw. wenn ein Niederschlagsereignis nicht länger als ein bis zwei Stunden anhält.

³⁰ Kellermann, C. (2003) und Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992)

³¹ Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992)



Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der Versickerungsrate³²

Der in Abbildung 6 dargestellte Versickerungsverlauf in den beiden Phasen A und B ist grundsätzlich auch bei wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen zu beobachten. Für Versuchsdauern länger als zwei Stunden liegen dagegen bislang keine Ergebnisse vor. Allerdings zeigen bisherige Messungen an verschiedenen Pflasterflächen sowohl über die Versuchsdauer abnehmende als auch zunehmende und konstante Infiltrationsraten.³³ Bei Untersuchungen von Flöter u.a. an fugenarmen Pflaster- und Plattenbelägen traten bei 45% der Messungen geringfügig abnehmende, bei 30% der Messungen zunehmende und bei 25% der Messungen konstante Versickerungsraten auf.³⁴ Die Messungen wurden hierbei über einen Zeitraum von fünf Jahren auf drei Testfeldern jeweils am gleichen Messpunkt durchführt. Sie belegen, dass das Versickerungsvermögen und der Infiltrationsverlauf wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen einer hohen Variabilität unterlegen sind.

Bei natürlichen Böden weist neben der Infiltrationsrate auch die zeitliche und räumliche Veränderung des Wassergehaltes im Tiefenprofil einen charakteristi-

³² nach Jonasson, S. A. (1984)

³³ z.B. Flöter, O. (2006) und Bean, E. (2005)

³⁴ Flöter, O. (2006); S. 135 ff

schen Verlauf auf, der in Abbildung 7 für einen homogenen Boden schematisch dargestellt ist.³⁵



Abbildung 7: Wassergehaltsprofil einer Infiltrationsfront bei Überstau

Bei kontinuierlichem Wassernachschub können sich bis zu vier unterschiedliche Zonen im Tiefenprofil ausbilden. Die Sättigungs- und die Übergangszone erstrecken sich dabei meist nur über wenige Zentimeter, während sich die Transportzone sukzessive ausdehnt und die Befeuchtungszone tiefer in den Boden eindringt. Die Vorrückgeschwindigkeit der Befeuchtungsfront ist dabei zunächst infolge des hohen hydraulischen Gradienten recht groß und nähert sich nach und nach einem konstanten Wert an, der von der aktuellen Wasserleitfähigkeit in der Transportzone abhängt. Eine Aufsättigung des Porenvolumens von 70% wird dabei meist nicht überschritten. Bei weniger starker Wasserzufuhr bleibt auch die oberste Bodenschicht ungesättigt, so dass sich weder Sättigungs- noch Übergangszone ausbilden. Es stellt sich dann lediglich der Wassergehalt ein, bei dem die herangeführte Wassermenge bei der zugehörigen ungesättigten Leitfähigkeit gerade abgeführt werden kann.

Es wird davon ausgegangen, dass sich im Baukörper von wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen ein ähnliches Tiefenprofil beim Infiltrationsvorgang bildet,

³⁵ nach Kölbl, A. (2006)

wobei die Dynamik der Durchfeuchtung in hohem Maße von der Durchlässigkeit der Deckschicht und den Eigenschaften der verwendeten Baustoffe abhängt.

Zur mathematischen Beschreibung des Infiltrationsvorganges auf natürlichen Böden wurden ebenfalls verschiedene empirische Formeln entwickelt, u.a. von Green and Ampt (1911), von Kostiakov (1932), von Horton (1940), von Philip (1957, 1969) und von Holtan (1967). Auf eine Beschreibung dieser Ansätze wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Fachliteratur verwiesen³⁶.

³⁶ z.B. Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992), S. 185 ff; Maniak, U. (1993), S. 287 ff oder Maidment, D. R. (1993), S. 5.1 ff

2.3 Erfassung von Abfluss- und Versickerungsprozessen in der Stadthydrologie

Bei der Berechnung des Oberflächenabflusses von kanalisierten Siedlungsflächen werden generell die "Verluste" des betrachteten Niederschlages bilanziert. Als Verlust wird hierbei der Anteil des Niederschlages bezeichnet, der auf der Fläche durch Benetzung, Pfützenbildung und Füllung sonstiger Oberflächenvertiefungen, Verwehung, Verdunstung und/oder Versickerung zurückgehalten wird. Die Differenz aus Gesamtniederschlag und Gesamtverlusten wird als Effektivniederschlag bezeichnet und stellt das Abflussvolumen einer Fläche dar, das aus einem Regenereignis oder einem Niederschlagskontinuum resultiert.

Die gängigen Berechnungsmethoden lassen sich nach dem Detaillierungsrad der Prozessbeschreibung unterscheiden. Die einfachste und bis heute wohl am häufigsten angewandte Methode stellt die Abflussbeiwertmethode dar. Hierbei wird das Oberflächenabflussvolumen als prozentualer Anteil des Brutto-Niederschlagvolumens ausgewiesen. Alle auftretenden Verluste werden somit durch eine Kenngröße pauschal abgedeckt. Niederschlags-Abfluss-Modelle bedienen sich dagegen einer detaillierteren Prozessbeschreibung und unterteilen den Vorgang der Abflussbildung in einzelne hintereinander geschaltete Teilprozesse, in der Regel die Benetzung, die Muldenauffüllung und die Versickerung. Die rechnerische Abbildung dieser Teilprozesse kann hierbei wiederum nach unterschiedlichen mathematischen Ansätzen erfolgen. Im Folgenden werden die verschiedenen Berechnungsmethoden kurz dargestellt und gängige Zahlen- bzw. Parameterwerte für wasserdurchlässige Flächenbeläge genannt.

2.3.1 Abflussbeiwertmethode

Der Abflussbeiwert ist ein definierter Quotient aus den Größen Abfluss und Niederschlag und gibt den prozentualen Anteil der Niederschlagshöhe an, der zum Abfluss kommt. Hierbei sind je nach Anwendungsfall und Zielsetzung der Betrachtung verschiedene Abflussbeiwerte zu differenzieren. Zum einen muss unterschieden werden zwischen Abflussbeiwerten zur Bemessung einerseits und Abflussbeiwerten als Ergebnis einer Abflusssimulation oder einer Abflussmessung andererseits. Darüber hinaus ist, v.a. bei der Bemessung, zwingend der jeweilige Anwendungsbezug zu berücksichtigen. So finden je nach Fragestellungen Spitzenabflussbeiwerte $\psi_{\rm S}$ oder mittlere Abflussbeiwerte $\psi_{\rm m}$ Anwendung, die jeweils in Bezug zu einer bestimmten Niederschlagsbelastung gesehen werden müssen.³⁷

³⁷ Schmitt, T.G. und Illgen, M. (2001)

Sowohl der Spitzenabflussbeiwert als auch der mittlere Abflussbeiwert werden zur Ermittlung der abflusswirksamen Fläche – ausgedrückt als anwendungsbezogenen Rechenwert A_u – herangezogen. Dabei ergeben sich je nach Anwendungsfall unterschiedliche Flächenkennwerte A_{u,i}, die durch entsprechende Indizes gekennzeichnet werden können. Der Kennwert A_u, der zur Kanalnetzdimensionierung gemäß DWA-A 118 (2006) und unter Verwendung von Spitzenabflussbeiwerten ermittelt wird, kann bspw. mit A_{u,A118} gekennzeichnet werden. Er weicht z.T. erheblich vom Flächenkennwert A_{u,A117} des gleichen Einzugsgebietes ab, der zur Dimensionierung von Retentionsvolumina herangezogen wird.³⁸

Mittlerer Abflussbeiwert

Der mittlere Abflussbeiwert wird zur Abschätzung eines Abflussvolumens herangezogen und ist grundsätzlich definiert als Quotient aus Abflussvolumen und Niederschlagsvolumen für einen definierten Zeitraum:

$$\psi_m = \frac{Abflussvolumen}{Niderschlagsvolumen} = \frac{\int_0^T Q(t) \cdot dt}{h_N \cdot A}$$

Dieser Zeitraum kann hierbei ein einzelnes abgegrenztes Niederschlagsereignis wie auch einen langfristigen Zeitraum umfassen (z.B. als Jahreswert im langjährigen Mittel). Als Ergebnis einer Abflussmessung oder einer Abflusssimulation hat der betrachtete Zeitraum einen großen Einfluss auf die Größe des Abflussbeiwertes.

Als Bemessungswert soll der mittlere Abflussbeiwert das für die jeweilige Bemessungsaufgabe zu erwartende Regenabflussgeschehen repräsentieren und ist daher stets mit Bezug auf eine für die jeweilige Fragestellung maßgebende Niederschlagsbelastung zu wählen. So bezieht sich der mittlere Abflussbeiwert im Kontext von DWA-A 117, DWA-A 138 und ATV-DVWK-M 153 auf einen der Fragestellung angemessenen Starkniederschlag (als Bemessungsregen). Im Kontext des ATV-Arbeitsblattes A 128 (1992) hingegen wird der mittlere Abflussbeiwert ψ_{A128} als langjähriger Jahresmittelwert zur Ermittlung der abflusswirksamen Jahresniederschlagshöhe verstanden. Er charakterisiert den jährlichen Niederschlagsanteil, der nach Abdeckung der Benetzungs- und Muldenverluste

³⁸ Vor diesem Hintergrund verbietet sich eine unkritische Übernahme eines Flächenkennwertes A_u aus anderen Anwendungsfällen des gleichen Gebietes. Da sich eine Fehleinschätzung der abflusswirksamen Fläche nahezu proportional auf die Dimensionen von Entwässerungsanlagen und damit auch erheblich auf deren Kosten auswirkt, ist bei der Wahl der Abflussbeiwerte bzw. bei der Ermittlung der jeweils abflusswirksame Fläche besondere Sorgfalt geboten. Es empfiehlt sich, die diesbezüglichen Ausführungen des ATV-DVWK-Arbeitsblattes A 198 (2003) zu beachten.

von befestigten Einzugsgebietsflächen vollständig zum Abfluss kommt und dient somit der Bewertung der abflussmindernden Wirkung nicht oder durchlässig befestigter Einzugsgebietsanteile. Die Abflussbeiwerte weisen folglich in ihrer Größe entsprechende Unterschiede auf.

Spitzenabflussbeiwert

Der Spitzenabflussbeiwert ψ_s wird in erster Linie verwendet, um im Rahmen von Kanalnetzberechnungen nach dem Fließzeitverfahren (z.B. Zeitbeiwertverfahren) die Abflussspitze zu ermitteln, die aus einem bemessungsrelevanten Starkregenereignis resultiert. Er ist als Quotient aus der maximalen Regenabflussspende q und der zugehörigen Regenspende r definiert:

 $\psi_{S} = \frac{max.Re\,genabflussspende}{zugehörige\,Re\,genspende} = \frac{q_{max}}{r}$

Bei der zugehörigen Regenspende handelt es sich nach DIN 4045 (1985) um die konstante Regenspende eines Blockregens. Weitere Angaben zur Regenspende, beispielsweise zur zugrunde liegenden Zeitbasis o.ä., sind dagegen weder im deutschen Normenwerk noch im Regelwerk der DWA zu finden. Die Unterschreitung eines Zeitintervalls von kleiner fünf Minuten erscheint hier jedoch nicht zielführend.

Darüber hinaus wird in Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198 (2003) ausdrücklich betont, dass sich der im Zuge von Bemessungsaufgaben herangezogene Spitzenabflussbeiwert stets auf einen Bemessungsregen konstanter Intensität bezieht und mit Bezug auf eine bestimmte Regenintensität festgelegt werden sollte.

Abflussbeiwerte im technischen Regelwerk

Das technische Regelwerk der DWA und verschiedene Normen enthalten Empfehlungen zu Abflussbeiwerten durchlässiger Flächenbeläge, die zur Bemessung herangezogen werden können. So empfehlen die DWA-Arbeitsblätter A 117 (2006) und A 138 (2005) sowie das ATV-DVWK-Merkblatt M 153 (2000) mittlere Abflussbeiwerte ψ_m . Zur Bemessung von Regenentlastungsanlagen in Mischsystemen im Zuge des Bemessungsganges nach ATV-Arbeitsblatt A 128 (1992) empfiehlt das ATV-DVWK-Merkblatt M 177 (2001) Zahlenwerte für den anwendungsbezogenen Abflussbeiwert ψ_{A128} . Spitzenabflussbeiwerte finden sich u.a. in der DIN 1986-100 (2007) sowie der DIN EN 752-4 (1997). Die in den verschiedenen Regelwerken empfohlenen Zahlenwerte für die unterschiedlichen Abflussbeiwerte sind in nachstehender Tabelle 3 zusammengestellt. Die tabellarischen Empfehlungen der einzelnen Richtlinien sind im Anhang enthalten.

 Tabelle 3:
 Empfohlene Abflussbeiwerte für unterschiedliche Flächenbefestigungen

Flächencharakt nach ATV-DVW	erisierung K-M 153	ATV-DVWK M 153	ATV-DVWK M 177	DIN 1986-100*)
Flächentyp	Art der Befestigung	Ψ м153	ΨA128	Ψs
Cebrägdach	Metall, Glas, Schiefer, Faserzement	0,9 - 1,0	1,0	1,0
Schraguach	Ziegel, Dachpappe	0,8 - 1,0	1,0	1,0
Flachdach	Metall, Glas, Faserzement	0,9 - 1,0	1,0	1,0
(Neigung bis 3°	Dachpappe	0,9	1,0	—
oder ca. 5 %)	Kies	0,7	0,9	0,5
Gründach	humusiert < 10 cm Aufbau	0,5	0,8	0,5
oder ca. 25 %)	humusiert ≥ 10 cm Aufbau	0,3	0,6	0,3
	Asphalt, fugenloser Beton	0,9	1,0	1,0
	Pflaster mit dichten Fugen	0,75	0,9	0,7
Straßen, Wege	fester Kiesbelag	0,6	0,8	0,5 *)
und Plätze	Pflaster mit offenen Fugen	0,5	0,7	0,7
(flach)	lockerer Kiesbelag, Schotterrasen	0,3	0,6	0,0
	Verbundsteine mit Fugen, Sickersteine	0,25	0,5	0,6
	Rasengittersteine	0,15	0,4	0,0 *)
Böschungen	toniger Boden	0,5	_	—
Bankette und	lehmiger Sandboden	0,4		—
Gräben	Kies- und Sandboden	0,3	—	—
Gärten, Wiesen	flaches Gelände	0,0 - 0,1		—
u. Kulturland	steiles Gelände	0,1 - 0,3	—	—

*) Die Flächendifferenzierung nach DIN 1986-100 unterscheidet sich von der Einteilung im DWA-Regelwerk. Die Zuordnung der empfohlenen Zahlenwerte für ψ_s nach DIN 1986-100 erfolgte sinnentsprechend für diejenigen Flächentypen, für die dies möglich ist.

Hinsichtlich des Spitzenabflussbeiwertes gibt das DWA-Regelwerk im aktuellen DWA-Arbeitsblatt A 118 (2006) lediglich Zahlenwerte für ganze Teileinzugsgebiete in Abhängigkeit vom Befestigungsgrad, der Regenspende und der Geländeneigung an. Die Zahlenwerte beinhalten zudem Abflussbeiträge nicht befestigter Einzugsgebietsflächen. Eine Differenzierung nach jeweiligem Flächentyp wird hier nicht getroffen. Die DIN EN 752-4 (1997) empfiehlt pauschal für "Durchlässige Flächen" einen Spitzenabflussbeiwert von "0 bis 0,3, je nach Geländeneigung und Oberflächenbeschaffenheit".³⁹ Eine ähnlich detaillierte Differenzierung nach Flächenarten und -beschaffenheit wie in der DIN 1986-100 oder im Merkblatt M 153 findet sich hier nicht.

³⁹ siehe Tabelle A - 3

Somit stehen zwar für verschiedene wasserdurchlässige Flächenbeläge Abflussbeiwerte für unterschiedliche Bemessungsaufgaben zur Verfügung, allerdings wäre eine weitergehende Differenzierung nach Flächenarten wünschenswert, die das Spektrum der auf dem Markt erhältlichen Flächentypen besser widerspiegelt. Dies gilt insbesondere für den Spitzenabflussbeiwert, für den bislang nur eine sehr grobe Unterteilung hinsichtlich Flächentyp und Flächenbeschaffenheit vorgenommen wird.

In Bezug auf die handelsüblichen Pflastersysteme wäre bspw. eine Differenzierung in fugenarmes Normalpflaster (3-4 mm Fuge) sowie Sickerfugenbeläge mit unterschiedlichen Fugenbreiten, Fugenanteilen und/oder Fugenmaterialien (Begrünung, Sand, Splitt) sinnvoll. Darüber hinaus liegen für poröse Flächenbeläge, bei denen die Versickerung durch den Stein selbst erfolgt, bislang keinerlei Empfehlungswerte vor. Des Weiteren fehlt dem Planer eine fundierte Entscheidungsgrundlage, inwieweit die Abflussbeiwerte an bestimmte Gefälleverhältnisse, Niederschlagsbelastungen, Kolmatierungsgrade etc. anzupassen sind.

Gerade der Einfluss der betrachteten bzw. zugrunde gelegten Niederschlagsbelastung darf bei der Bemessung nicht unterschätzt werden. Dies sei an einem einfachen Zahlenbeispiel verdeutlicht. Für eine Fläche, die eine mittlere Versickerungskapazität von rd. 50 l/(s·ha) aufweist, würde sich bei Vernachlässigung sonstiger Verluste für einen Niederschlag mit einer Regenspende von 100 l/(s·ha) ein mittlerer Abflussbeiwert in der Größenordnung von $\psi \approx 0,5$ ergeben. Bei einem Niederschlag mit einer Regenspende von 200 l/(s·ha) ergäbe sich eine Größenordnung von $\psi \approx 0,75$; bei einer Regenspende von 75 l/(s·ha) würde eine Größenordnung von $\psi \approx 0,33$ resultieren.

Das Beispiel verdeutlicht die starke Abhängigkeit der Abflussbeiwerte von der jeweiligen Niederschlagsbelastung und unterstreicht die Notwendigkeit, Abflussbeiwerte im Zuge von Bemessungsverfahren jeweils mit Bezug auf eine bestimmte Regenbelastung zu wählen, wie es das Regelwerk der DWA zurecht fordert. Die Verwendung von Abflussbeiwerten ohne konkrete Differenzierung nach Regendauer- und/oder Regenintensität wird den heutigen Ansprüchen an die Genauigkeit von Bemessungen nicht mehr gerecht. Hierzu bedarf es jedoch abgesicherter Empfehlungswerte.

Eine Darstellung der in den unterschiedlichen Regelwerken ausgewiesenen Abflussbeiwerte für durchlässige Flächenbefestigungen zeigt Abbildung 8. Die Grafik dokumentiert, dass zwischen den unterschiedlichen Regelwerken z.T. deutliche Inkonsistenzen bezüglich der empfohlenen Zahlenwerte herrschen, die bei Vorliegen verbesserter Kenntnisse zum Abfluss- und Versickerungsverhalten wasserdurchlässiger Flächenbeläge behoben werden sollten. Insbesondere zwischen den Angaben des DIN und den Angaben des DWA-Regelwerkes bzw. zwischen den Spitzenabflussbeiwerten einerseits sowie den mittleren Abflussbeiwerten ψ_{M153} andererseits sind die angegebenen Werte nicht durchweg schlüssig.



So ist es beispielsweise nicht plausibel, dass für den Spitzenabflussbeiwert nach DIN 1986-100 teilweise deutlich niedrigere Zahlenwerte angegeben werden als für die mittleren Abflussbeiwerte im DWA-Regelwerk, zielt der Spitzenabflussbeiwert doch auf kurze Starkregenereignisse mit Regenspenden in der Größenordnung von 300 l/(s·ha) ab. Dies gilt mit Ausnahme von "Fugenverbund- und Sickerfugenpflaster" für a in Abbildung 8 aufgeführten Flächenkategorien.⁴⁰

Die Abflussbeiwerte für Gründächer sowie für Flachdächer mit Kiesdeckungen sind ebenfalls nicht aufeinander abgestimmt, weist das Merkblatt M 177 doch auch hier höhere Zahlenwerte für den Abflussbeiwert ψ_{A128} aus als die DIN 1986-100 für den Spitzenabflussbeiwert ψ_{S} (siehe Tabelle 3).

2.3.2 Modellansätze zur Niederschlags-Abfluss-Simulation wasserdurchlässiger Siedlungsflächen

Die Simulation des Oberflächenabflusses unterteilt sich in der Regel in die beiden Phasen der Abflussbildung und der Abflusskonzentration. Zur Ermittlung des abflusswirksamen Niederschlages werden die auftretenden Verluste erfasst. Bei den undurchlässig befestigten Flächen treten hierbei in erster Linie Benetzungsund Muldenverluste auf, die als pauschale Verlustwerte oder zeitlich gestaffelt nach verschiedenen Berechnungsmethoden abgebildet werden.⁴¹ Bei durchlässig

⁴⁰ Eine Vergleichbarkeit zum Abflussbeiwert ψ_{A128} ist dagegen wegen der Ausklammerung der Anfangsverluste sowie des Bezuges auf befestigte Flächen nur bedingt möglich.

⁴¹ siehe bspw. Verworn, H.-R. und Kenter, G. (1993)

befestigten Flächen sind zusätzlich Versickerungsverluste zu berücksichtigen, auf die nachfolgend verstärkt eingegangen wird. Die Prozesse der Interzeption, Retention und Infiltration werden hierbei meist nacheinander berechnet, auch wenn sie z.T. zeitgleich ablaufen.⁴²

Die zu Beginn eines Niederschlages erfolgende Befeuchtung der Oberfläche eines Flächenbelages wird in der Regel als Anfangsverlust mit flächenspezifischer Verlusthöhe bilanziert, die von den Niederschlagshöhen der einzelnen Zeitintervalle abgezogen wird. Die Benetzungsverluste bei durchlässigen Flächen können aufgrund der Rauhigkeit der Oberfläche und der Vegetationsdecke dabei z.T. wesentlich höhere Werte annehmen als bei undurchlässigen Flächen. Das in den Wintermonaten infolge reduzierter Vegetation verringerte Interzeptionsvermögen wird dabei oftmals durch entsprechende jahreszeitspezifische Abminderungsfaktoren erfasst.

Nach Beendigung der Interzeptionsphase wird ein Teil des Niederschlagswassers auf der Oberfläche in Bodenunebenheiten und Vertiefungen zurückgehalten (Muldenverlust). In der Realität erschöpft sich die Rückhaltefähigkeit der Mulden bei fortdauerndem Niederschlag entsprechend der heterogenen Zusammensetzung aus Unebenheiten verschiedener Größe und verschiedener Speicherfähigkeit, bis letztlich alle Mulden gefüllt sind. Der Muldenverlust ist somit ein zeitlich veränderlicher Vorgang, der sich asymptotisch einem Endwert annähert und bspw. durch die sog. Grenzwertmethode mathematisch beschrieben werden kann.⁴³ Da zwischen dem Benetzungsverlust und dem Muldenverlust ein fließender Übergang besteht, werden beide jedoch oftmals vereinfachend als Anfangsverlust zusammengefasst.

In niederschlagsfreien Perioden findet, in erster Linie infolge von Verdunstung, ein Abtrocknen der Oberfläche und damit eine Regeneration der Interzeptionssowie der Retentionskapazität der Flächenbefestigungen statt. Dieser Prozess wird in der Regel über mittlere monatliche Verdunstungshöhen modelltechnisch erfasst und berücksichtigt dabei die jahreszeitlich variierenden Evaporationsraten. Bei der Simulation eines Niederschlagskontinuums wird die akkumulierte Verlusthöhe der Oberfläche bei Ende des jeweils vorangegangenen Regenereignisses (Restpotential) entsprechend berücksichtigt.

⁴² Je nach Berechnungsmodell wird die Prozessphase der Muldenauffüllung dem Infiltrationsprozess vor- oder nachgeschaltet.

⁴³ siehe bspw. Verworn, H.-R. und Kenter, G. (1993)

Der in Deutschland wohl gängigste Modellansatz zur Simulation des Versickerungsvorganges auf durchlässigen Flächen innerhalb von Siedlungsgebieten ist der Ansatz von Horton (1940) bzw. seine Erweiterung durch Paulsen (1987).⁴⁴

Der Berechnungsansatz beschreibt das sich während eines Regenereignisses ändernde Infiltrationsvermögen, ausgehend von einer Anfangsinfiltrationsrate bis zum Erreichen der Endinfiltration, als Funktion von der Zeit. Die allgemeine Berechnungsgleichung nach Horton wird durch Gleichung (H1) wie folgt ausgedrückt:

$$f(t) = f_e + (f_0 - f_e) \cdot e^{-k \cdot t}$$
 (H1)

- f(t): Infiltrationsrate in $[I/(s \cdot ha)]$ zur Zeit t
- f_0 : Anfangsinfiltrationsrate in [l/(s·ha)] zur Zeit t = 0
- f_e : Endinfiltrationsrate in [l/(s·ha)] zur Zeit t = ∞
- k: Abnahmekoeffizient während des Regenereignisses in [1/min]

Für die modelltechnische Anwendung des Infiltrationsansatzes ist eine rekursive Berechnungsgleichung erforderlich, bei der sich die Infiltrationsrate f_i am Ende des i-ten Intervalls aus der vorangegangenen Infiltrationsrate f_{i-1} berechnen lässt. Die rekursive Berechnung erfolgt nach der Erweiterung von Paulsen durch Gleichung (H2), wobei für Niederschlagsphasen, bei denen die Regenintensität die aktuelle Infiltrationskapazität unterschreitet, eine idealisierte Aufteilung der zugehörigen Berechnungszeitschritte erfolgt. Darüber hinaus wird durch Umkehrung von Gleichung (H2) die Regeneration der Versickerungskapazität während Trockenphasen nachgebildet (siehe Gleichung (H3)). Eine detaillierte Beschreibung des Berechnungsansatzes von Horton/Paulsen ist u.a. bei Verworn (1999) zu finden.

$$f_i = f_e + (f_{i-1} - f_e) \cdot e^{-k \cdot \Delta t}$$
(H2)

- fi: Infiltrationsrate des i-ten Intervalls in [l/(s·ha)]
- f_{i-1} : Infiltrationsrate des vorangegangenen Intervalls in [l/(s·ha)]
- ∆t: Intervalllänge

$$f_{i} = f_{0} - (f_{0} - f_{i-1}) \cdot e^{-kD \cdot \Delta t}$$
(H3)

 f_i : Infiltrationsrate des i-ten Intervalls in [l/(s·ha)]

 k_D : Regenerationskonstante während Trockenphasen in [1/min]

⁴⁴ siehe bspw. Verworn, H.-R. (1999)

Der Ansatz von Horton wurde für natürliche Gewässereinzugsgebiete und somit für weitgehend natürliche, sowie land- und forstwirtschaftlich genutzte Böden entwickelt und auf versickerungsfähige Flächen in städtischen Einzugsgebieten⁴⁵ übertragen. Bis heute spiegeln dies die empfohlenen Parameterwerte wider, die recht unspezifisch sind und lediglich die jeweilige Bodenart berücksichtigen. Verworn (1999) gibt bspw. nachstehende Infiltrationsparameter für unbefestigte Flächen an.

In der Fachliteratur finden sich dagegen keine expliziten Angaben über Parameterwerte zur Bestimmung der Infiltration nach Horton/Paulsen, die mit den hier schwerpunktmäßig betrachteten wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen kompatibel sind. Die in der Literatur genannten Parameterwerte⁴⁶ beziehen sich vorwiegend auf die pauschale Betrachtung unbefestigter Flächen innerhalb eines Einzugsgebietes und erstrecken sich über einen weiten Wertebereich.⁴⁷ Folgende Zahlenwerte werden hierbei für die einzelnen zuvor genannten Versickerungsparameter angegeben (Tabelle 4).

Modellparameter		Bodenart						
		Sand/Kies	Feinsand/ Iehm. Sand	sand. Lehm/Löß	Lehm/Ton			
Anfangsinfiltrationsrate f_0	[l/(s·ha)]	300	167	167	50			
Endinfiltrationsrate f _e	[l/s·ha]	27	17	8	5			
Abnahmekoeffizient k	[1/min]	0,09	0,06	0,05	0,03			
Regenerationskoeffizient k_D	[1/min]	0,011	0,0005	0,0003	0,0001			

Tabelle 4:	Bodenarten und Parameter für den erweiterten Ansatz nach Ho	rten
	/Paulsen ⁴⁸	

In Untersuchungen von Schmitt und Illgen⁴⁹ wurden die Modellparameter im Ansatz von Horton/Paulsen an die für bemessungsrelevante Blockregen jeweils empfohlenen Abflussbeiwerte ψ_m und ψ_s sowie an die Ergebnisse verschiedener Infiltrometerversuchen für verschiedene Flächenbeläge angepasst. Die Parameterwerte wurden dabei jeweils so gewählt, dass die Berechnungen eine möglichst hohe Übereinstimmung mit den empfohlenen Abflussbeiwerten bzw. den Infiltra-

⁴⁵ ursprünglich in erster Linie nicht befestigte; später auch durchlässig befestigte Flächen

⁴⁶ u.a. ATV-DVWK (2004); James, W. (1998); Verworn, H.-R. (1999); Pecher, R. (1969)

⁴⁷ Schmitt, T. G. (2000)

⁴⁸ Verworn, H.-R. (1999)

⁴⁹ teilweise publiziert in Schmitt, T.G. und Illgen, M. (2001)

tionsverläufen ergeben. Eine Übersicht der Parameterwerte, die aus der Anpassung an die im Regelwerk ausgewiesenen Abflussbeiwerte resultierten, zeigt Tabelle 5. Sie entsprechen i.W. den jüngst von der DWA-Arbeitsgruppe ES-2.6 empfohlenen Zahlenwerten.50

Flächenbefestigung	Verlus	thöhen	Anpassung an BR D = 2 h h_N = 25 mm			Anpassung an BR D = 15 min r = 215 l/(s·ha)				
Katgeorien nach ATV-DVWK-M153	h _{v,B}	h _{v,м}	f _o	f _e	k	f _o	f _e	k	Ergebnis Ψs	Zielwert ¥s
Schrägdach: - Metall, Glas, etc.	0,2		[1,0	1,0
- Ziegel, Dachpappe	0,4								1,0	1,0
Flachdach: - Metall, Glas, etc.	0,2								1,0	1,0
- Dachpappe	0,4								1,0	1,0
- Kies	0,4	2,6	4	4		15	15		0,93	0,95
Gründach: - Aufbau < 10 cm	0,6	3,9	50	7	0,20	70	20	0,20	0,88	0,9
- Aufbau ≥ 10 cm	0,8	5,2	83	11	0,10	115	35	0,10	0,66	0,7
Asphalt, fugenloser Beton	0,4	1,6	_		—				1,0	1,0
Pflaster fugendicht	0,4	1,6	4	4		20	20		0,91	0,9
Pflaster mit Fugen	0,4	2,6	12	12	—	40	40		0,81	0,8
Kiesbelag fest	0,4	2,1	8	8		30	30		0,86	0,9
Kiesbelag locker	0,5	3,5	17	17		65	65		0,70	0,7
Schotterrasen	0,6	3,4	25	17	0,20	150	45	0,20	0,72	0,7
Fugenverbundsteine, Sickersteine	0,6	3,9	21	21		160	60	0,15	0,60	0,6
Rasengittersteine	0,8	5,2	35	28	0,15	180	65	0,15	0,51	0,5

					(
Tabelle 5:	Parameterwerte zur	Abflussbildung na	ach Schmitt und	i Iligen ((2001)

h_{v,B}: Benetzungsverlusthöhe [mm] h_{v.M}: Muldenverlusthöhe [mm]

f_o: Angfangsversickerungsrate [l/(s·ha)] Endversickerungsrate [l/(s·ha)]

k: Abnahmekoeffizient [h⁻¹] ψ_S : Spitzenabflussbeiwert [-]

Die Zahlenwerte dokumentieren die Defizite im Berechnungsansatz von Horton/Paulsen, der nicht in der Lage ist, mit einer einheitlichen Parametereinstellung plausible Ergebniswerte für unterschiedliche Niederschlagsbelastungen zu liefern (Anpassung an ψ_m einerseits und ψ_s andererseits). Dies deutet darauf hin, dass wasserdurchlässige Flächenbeläge (v.a. Pflasterflächen) hinsichtlich der Versickerungsvorgänge zu stark von bewachsenen Flächen abweichen, für die der Horton-Ansatz ursprünglich entwickelt und bisher überwiegend angewandt wurde.

f_e:

Neben dem Ansatz von Horton/Paulsen ist in Deutschland auch das Infiltrationsmodell von Neumann (1976) gebräuchlich, das Füllungs- und Entleerungsvor-

⁵⁰ DWA (2007): Oberflächenabfluss von durchlässig befestigten Flächen, Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe ES-2.6

gänge des Bodenkörpers als Speicher nachbildet und beispielsweise im Programm HYSTEM-EXTRAN (itwh) implementiert ist. Beide Ansätze unterscheiden sich von der jeweils zugrunde liegenden Modellvorstellung, lassen sich jedoch mathematisch ineinander überführen und führen folglich zu (nahezu) gleichen Berechnungsergebnissen. Dennoch weist der Ansatz von Neumann einige berechnungstechnische Nachteile auf, da die rechnerische Infiltrationskapazität und die aktuelle Speicherfüllung von der Größe der Zeitintervalle abhängig sind, was bei unterschiedlichen Zeitschritten zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, sollten bei der Berechnung konstante Zeitintervalle eingehalten werden.⁵¹

Im englischsprachigen Raum finden darüber hinaus das SCS-Verfahren und der Ansatz von Green-Ampt häufig Anwendung. Auf diese Berechnungsmethoden wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen und auf die internationale Fachliteratur verwiesen.⁵²

⁵¹ Verworn, H.-R. und Kenter, G. (1993)

⁵² z.B. Akan, A.O. (2003); Akan, A.O. und Houghtalen, R.J. (2003); Maniak, U. (1993) oder Maidment, D. R. (1993)
2.4 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 Borgwardt (1994, 1995), Binnewies und Schütz (1985), Kretzer und Ruid-Rodrigez (1992), Muth (1994), Schramm (1996), Hanses et al. (1999), Dierkes (1999), Zimmer (1998), Kolb (2000), Timmermann (1998, 2000), Nolting et al. (2005), Flöter (2006) und Fach (2006). Die im Kontext der hier behandelten Fragestellungen bedeutsamsten Untersuchungen und die gewonnenen Erkenntnisse sollen nachfolgend knapp zusammengefasst werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen liefern für verschiedene Flächenbefestigungen u.a. Abflussbeiwerte, aufnehmbare Regenspenden oder Durchlässigkeitsbeiwerte. Darüber hinaus wurde in den genannten Veröffentlichungen vielfach Kritik an den in der Norm enthaltenen Abflussbeiwerten und der zu undifferenzierten Flächeneinteilung geübt. Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen jedoch vielfach keinen direkten Vergleich untereinander zu bzw. nur in sehr eingeschränktem Maße. Die Messungen wurden unter unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt, nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewertet und/oder es wurden unterschiedliche Materialen und Flächenarten (teilweise unterschiedlichen Alters) betrachtet. Die Untersuchungsergebnisse weisen de facto z.T. erhebliche Diskrepanzen untereinander als auch zu den ohnehin inkonsistenten Angaben der verschiedenen technischen Regelwerke auf (Abflussbeiwerte, Versickerungsleistungen).

Eine der ersten gezielten Untersuchungen zum Wasserhaushalt versickerungsaktiver Flächenbefestigungen wurde von den Berliner Wasserwerken in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin Anfang der 1980er Jahre durchgeführt.⁵³ Neben Laboruntersuchungen umfasste das Forschungsvorhaben Freilandversuche an verschiedenen Pflasterflächen, u.a. Verbundpflaster aus Beton, Klinkerpflaster und Mosaikpflaster. Es zeigte sich hierbei, dass diese eher als versickerungsschwach eingestuften Belagstypen durchaus beachtliche Versickerungsleistungen aufweisen können.

Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurden neue Pflasterflächen mit Intensitäten von bis zu 80 l/(s·ha) bei unterschiedlichem Gefälle (0%, 2,5% und 5,0%) in

⁵³ Berliner Wasserwerke (Hrsg.) (1984)

einem Versuchsstand mit konstanten Intensitäten beregnet. Besonders hohe Versickerungsleistungen wurden hierbei von den untersuchten Kleinstein- und Mosaikpflasterbelägen erzielt, bei denen auch die höchsten betrachteten Beregnungsintensitäten quasi vollständig und unabhängig vom Gefälle in den Oberbau infiltrierten. Der Fugenanteil dieser Flächen lag bei 15% bzw. 32%.

Ein Einfluss der Oberflächenneigung zeigte sich bei den Verbundpflasterflächen aus Beton mit Fugenanteilen von 7% und 8%. Während bei neigungsfreier Oberfläche erst bei 37 l/(s·ha) bzw. 57 l/(s·ha) Oberflächenabfluss einsetzte, geschah dies bei einem Gefälle von 5% bereits bei 18 l/(s·ha) bzw. 42 l/(s·ha). Bei höherer Beregnungsintensität (und gleichzeitigem Oberflächenabfluss) wurden höhere Infiltrationsraten verzeichnet, die eine Größenordnung von 30-70 l/(s·ha) erreichten. Während bei den mit 5% Gefälle verlegten Verbundpflasterflächen im Vergleich zur neigungsfreien Fläche die Infiltrationsrate um ca. 10% geringer ausfiel, waren zwischen den Versuchen bei 0% und 2,5% Gefälle keine nennenswerten Unterschiede zu verzeichnen.

Die Freilanduntersuchungen wurden an 13 nicht wägbaren Lysimetern auf einer ungenutzten Freifläche (nur Witterungseinfluss) sowie auf zwei bestehenden Parkplätzen im Berliner Stadtgebiet durchgeführt und umfassten i.w. das gleiche Flächenspektrum wie die Laborversuche, noch ergänzt um porösen Asphalt, Rasengittersteine und Rollrasen. Die Messungen wurden hierbei für Oberflächenneigungen bis zu 2,5% durchgeführt.

Die Lysimeterbeobachtungen ergaben, dass ein hoher Anteil des Jahresniederschlages auf den Flächen zurückgehalten wird und dort versickert oder verdunstet. Dieser Anteil lag für alle untersuchten Flächen in einem ersten Betrachtungszeitraum von Mai bis September 1982 bei über 50%. Für die neu verlegte Verbundpflasterdecke wurde insgesamt ein Rückhalt des Jahresniederschlages von über 75%, für einen älteren Verbundpflasterbelag noch von 40% bis 70% ermittelt. Diese hohen Werte sind vor dem Hintergrund zu sehen, dass Niederschlagsintensitäten von über 25 l/(s·ha) nur einen geringen Anteil an der Jahresniederschlagshöhe ausmachen, der in der Größenordnung von ca. 15-25% liegt.⁵⁴ Entsprechend wirkt sich ein geringes bis moderates Versickerungsvermögen nennenswert auf die Jahresabflussbilanz aus. Bei Starkregenereignissen ist dagegen mit wesentlich höheren Abflussanteilen zu rechnen.

Die Messungen der Berliner Wasserwerke belegen darüber hinaus, dass über versickerungsfähig ausgebildeten Pflasterflächen u.U. mehr Niederschlagswasser in den Grundwasserleiter geführt werden kann als über Rasen- und Sandflächen, da bei diesen ein höherer Anteil des im Bodenkörper gespeicherten Regenwas-

⁵⁴ siehe bspw. Münchow, B. (1999) oder Binnewies, W. und Schütz, M. (1985)

sers wieder verdunsten kann. Dagegen konnte der Effekt der Abnahme des Versickerungsvermögens mit fortwährender Standzeit einer Fläche nicht ausreichend untersucht oder berücksichtigt werden.

Ein Teil der Messanlagen der Berliner Wasserwerke wurde daher über den Zeitraum 1980-1983 hinaus bis einschließlich 1990 weiter betrieben. Für den Zeitraum 1980-1990 ergaben sich für die betrachteten Flächenbefestigungen die in nachfolgender Grafik zusammengestellten Wasserbilanzwerte (Abbildung 9).⁵⁵ Bezogen auf die Jahresniederschlagshöhe wurde für sämtliche betrachteten Flächenbefestigungen ein Abflussrückhalt von über 80% festgestellt. Dabei variierte der Anteil des in die tieferen Bodenhorizonte weiter transportierten Niederschlagswassers je nach Flächenaufbau – sowohl bezogen auf die Jahresniederschlagshöhe als auch bezogen auf die in den Flächenaufbau infiltrierte Regenwassermenge – erheblich.

	Oberf	lächen	abflu	ISS		Infiltr	atio	n + Ev	aporat	ion		Infi	iltration +	Perkolat	ion
)%	10%	6	20%	30	1%	40	%	50%	. 6	0%	70)%	80%	90%	100%
16	+	28	-			+	5	56		-			Verbu	ndpflaster aus (Noppenform)	Beton
18	1		16			66		l		1		1	Verbu (Dop	ndpflaster aus	Beton eine)
10	2	20	i		70	I		i		i		i	i	Klinkerp	flaster
12	1	40	1			1		1	48	1		1	1	Mosaikpf	flaster
18	!		! 9	73		!		ļ		1		!	wasserdu	urchlässiger A	sphalt
7	34		i			1	59	1		1		, , ,	Rasengitterste	ine mit Rasene	einsaat
7	44		!	 		1		1	49	1		1		Bol	lirasen
	1		i			i		÷		i		i			
6	49		1			1			45	1		1	Sandfläc	he ohne Befes	tigung

Abbildung 9: Anteile des Oberflächenabflusses, der Infiltration, Evaporation und Perkolation an der Jahresniederschlagshöhe für verschiedene Flächenbefestigungen⁵⁶

⁵⁵ nach Nobis-Wichterding, H. (1993) zitiert in Münchow, B. (1999)

⁵⁶ *Infiltration* + *Evaporation* gibt die infiltrierte Regenwassermenge an, die anschließend wieder aus dem Oberbau verdunstet. *Infiltration* + *Perkolation* gibt die Regenwassermenge an, die nach den Infiltration in tiefere Horizonte perkoliert, aber nicht verdunstet.

Binnewies und Schütz untersuchten Mitte der 1980er Jahre im Auftrag der Baubehörde der Stadt Hamburg ebenfalls das Versickerungsvermögen verschiedener Pflasterbeläge.⁵⁷ Ihre Untersuchungen umfassten dabei Messungen an Bestandflächen als auch an neu verlegten Pflasterflächen. Für Kleinpflaster stellten sie mittlere Versickerungsraten von 5-339 l/(s·ha) fest, wobei die hohen Infiltrationswerte an einem 15 Jahre alten Standort gemessen wurden. Für Verbundpflaster ergaben ihre Untersuchungen mittlere Infiltrationsraten von bis zu 72 l/(s·ha), wobei an einer ebenfalls rd. 15 Jahre alten Bestandfläche Infiltrationsraten von 52 l/(s·ha) gefunden wurden. Für wassergebundene Decken konnten sie dagegen nur Versickerungsleistungen von 1-30 l/(s·ha) verzeichnen. Trotz der teilweise hohen Versickerungsraten der Bestandsflächen konnten Binnewies und Schütz die Reduzierung des Versickerungsvermögens durch den Eintrag von Feinpartikeln in die Fugen nachweisen.

Dellwig untersuchte ebenfalls verschiedene Flächenbefestigungen im Bestand, fokussierte sich jedoch auf Belagstypen zur gezielten und möglichst naturnahen Versickerung von Regenwasser. Mit Hilfe eines Doppelring-Infiltrometers bestimmte er sog. Basisversickerungsraten, die als Endversickerungsraten interpretiert werden können und in nachstehender Tabelle 6 wiedergegeben sind. Sie dokumentieren das sehr hohe Versickerungsvermögen insbesondere von begrünten Flächenbefestigungen mit hohem Anteil an versickerungswirksamer Fläche.

Flächenbefestigung	Infiltrationsrate [cm/min]	Infiltrationsrate [l/(s·ha)]
Schotterrasen	30	50.000
poröser Kunststoffbelag	12	20.000
Rasenpflaster	6,6	11.000
Rasengitterstein	2	3.333
Holzpflaster	1,4	2.333
Rasen	0,6	1.000
wassergebundene Decke	0,4	667
Rasenziegel (HESA)	0,3	500

Tabelle 6:	ndversickerungsraten für verschiedene naturnahe Flächenbefestigun-
	jen nach Dellwig ⁵⁸

Kretzer und Ruid-Rodrigez (TH Darmstadt) wandten zur Beprobung des Versickerungsvermögens von Pflasterflächen erstmals in Deutschland ein Tropfinfiltrome-

⁵⁷ Binnewies, W. und Schütz, M. (1985); zitiert u.a. in Münchow, B. (1999)

⁵⁸ Dellwig, M. (1988)

ter an, mit dem eine künstliche Beregnung der Untersuchungsfläche erfolgen kann.⁵⁹ Die Intensität der Beregnung wird dabei gerade so eingestellt, dass kein Oberflächenabfluss entsteht, um einen in der Natur nicht auftretenden vertikalen Wasserdruck zu vermeiden. Dies wird dadurch erreicht, dass der Zulauf über einen kapazitiven Abstandssensor, der den Aufstau auf wenige Millimeter begrenzt, gesteuert wird. Als Messergebnis resultieren Infiltrationsverläufe, welche die über die Versuchsdauer variierende Infiltrationsrate darstellen.

Kretzer und Ruid-Rodriguez fanden im Rahmen ihrer Untersuchungen u.a. für Verbundsteinpflaster Endinfiltrationsraten von 40-80 l/(s·ha), für Rasengittersteine von 150-180 l/(s·ha) und für poröse Verbundsteine aus Beton von 90-170 l/(s·ha) die über einen Zeitraum von einem Jahr mehrfach an verschiedenen Messpunkten an Bestandsflächen gemessen wurden. Die Versickerungsraten der Pflasterflächen lagen dabei z.T. deutlich über den gemessenen Werten an den ebenfalls untersuchten Flächen aus verdichteten Brechkorngemischen (Feldwege u.ä.).

Umfangreiche Untersuchungen über die Durchlässigkeit von Flächenbefestigungen wurden auch von Borgwardt zu Beginn der 1990er Jahre durchgeführt.⁶⁰ Im Mittelpunkt seiner Arbeit steht die Untersuchung des Versickerungsvermögens von Pflasterflächen in Abhängigkeit von Alter, Verkehrsbelastung und Fugenanteil. Borgwardt führte u.a. Feldversuche an verlegten und über Jahre genutzten Rad- und Gehwegen, Parkplätzen und minderbelasteten Straßenflächen an verschiedenen Standorten im Raum Hannover-Herrenhausen und Hameln-Tündern durch und konnte somit praxis- und anwendungsbezogene Ergebnisse für den Einsatz versickerungsaktiver Flächenbeläge gewinnen. Um die Versickerungsfähigkeit in situ an ungestörten Bestandsflächen zu untersuchen, verwendete Borgwardt das an der TH Darmstadt entwickelten Tropfinfiltrometer (s.o.).

Aus den gemessenen Ganglinien leitete Borgwardt Regressionskurven ab, die für die meisten Belagstypen den bereits in Kap. 2.2.5 beschriebenen charakteristischen Infiltrationsverlauf aufweisen, der durch hohe Infiltrationsraten in den ersten Minuten gekennzeichnet ist, die nachfolgend z.T. deutlich abnehmen und sich asymptotisch einem Endwert annähern (siehe auch Abbildung 6). Eine Gegenüberstellung der Infiltrationsverläufe an neuen und alten Pflasterflächen zeigt Abbildung 10. Weitere Ergebnisdarstellungen sind im Anhang enthalten.

⁵⁹ Kretzer, H. und Ruiz-Rodriguez, E. (1992)

⁶⁰ Borgwardt, S. (1995)



Abbildung 10: Messwerte von Borgwardt an neuen und alten Pflasterflächen und daraus abgeleitete Regressionskurven der Infiltrationsrate⁶¹

Des Weiteren leitete Borgwardt aus den Ergebnissen für neue Pflasterflächen eine mittlere potenziell aufnehmbare Regenspende – orientiert an der Versickerungsrate nach 15 Minuten – von 320 l/(s·ha) ab; für alte Pflasterflächen von 75 l/(s·ha). Seine Untersuchungen zeigen, dass vor allem in den ersten zehn bis fünfzehn Minuten eines Regens – selbst bei Flächenbelägen nach mehrjähriger Nutzung – durchaus beachtliche Niederschlagsintensitäten auf einer Pflasterfläche zurückgehalten werden können, ohne dass Oberflächenabfluss entsteht. Seine Messwerte bestätigen dabei größtenteils die Ergebnisse der Berliner Wasserwerke, liegen die gemessenen Versickerungsraten doch in ähnlichen Größenordnungen; vereinzelt aber auch deutlich höher.

Einschränkend muss jedoch angemerkt werden, dass die Ergebnisse von Borgwardt auf einer recht limitierten Anzahl von Einzelmessungen beruhen. Sie umfassen zwar rd. zehn verschiedene Flächenkategorien, aber lediglich rd. 30 unterschiedliche Messpunkte. Über die Repräsentativität dieser Standorte kann dabei keine Aussage getroffen werden. Die Messergebnisse an den unterschiedlichen Standorten bzw. Messpunkten weisen indes (zumindest teilweise) eine hohe Streuweite auf, wie das Diagrammensemble in Abbildung 11 zeigt.

Dennoch konnte Borgwardt erstmals den Einfluss der Liegedauer auf das Versickerungsvermögen aufzeigen und in erster Näherung quantifizieren. Er stellte dabei deutliche Unterschiede in der Infiltrationsleistung von neu eingebauten gegenüber gealterten Pflasterflächen fest.

⁶¹ nach Borgwardt (1995) ; zeitliche Verläufe des Versickerungsvermögen



Abbildung 11: Bandbreite der von Borgwardt gemessenen Anfangs- und Endinfiltrationsraten für verschieden Belagstypen⁶²

In weiteren Betrachtungen wurde die zeitliche Veränderung der Wasserdurchlässigkeit der Pflasterfugen eingehender analysiert. Hierzu wurden u.a. der Anteil an organischer Substanz, die Korngrößenverteilung und der Durchlässigkeitsbeiwert nach Beyer sowohl am unbeeinflussten Ausgangsstoff, dem aus dem Pflasterbett gewonnenen Pflastersand, als auch am veränderten Fugensand ermittelt. Borgwardt stellte fest, dass sich die Stoffeigenschaften des eingebauten Mineralstoffes in den Fugen im Laufe der Standzeit erheblich verändern. Hierbei ist insbesondere ein hochsignifikanter Anstieg der mineralischen und organischen Feinteile zu nennen, der eine Verringerung der Wasserdurchlässigkeit um eine Zehnerpotenz zur Folge hat (Kolmation). Die Ermittlung des zeitlichen Verlaufes der Zunahme der Feinteile ergab, dass bereits nach einem Standjahr eine erhebliche Verringerung der Versickerungsfähigkeit der Pflasterfugen eintreten kann.

⁶² nach Messdaten von Borgwardt; Anfangsinfiltrationsrate = Messwert nach 10 Minuten

Des Weiteren konnte Borgwardt feststellen, dass ein prozentualer Anstieg der Infiltrationsrate mit steigendem Fugenanteil nur bei neu eingebauten Flächen zu verzeichnen ist. Bei gealterten Flächen ist das Versickerungsvermögen vom Anteil der Grobporen des Mineralstoffgemisches abhängig. So werden bspw. bei grobkörnigen Splittgemischen eingetragene Feinteile über die Fuge in den Oberbau der Pflasterfläche transportiert, so dass die Verstopfung der Fugen deutlich geringer ausfällt und kein wesentlicher Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit der Gesamtkonstruktion zu erwarten ist. Bei feinkörnigeren Fugematerialen aus Sand hingegen können sich infolge der Kolmation auch bei sehr unterschiedlichen Fugenanteilen Versickerungsraten in gleicher Größenordnung ergeben.

Eine Gegenüberstellung der Anfangs- und der Endinfiltrationsraten für alte Pflasterflächen mit engen Fugen sowie alte Pflasterflächen mit weiten Fugen zeigt Abbildung 12. Die Grafik veranschaulicht, dass zwar für beide Flächentypen die jeweiligen Mittelwerte in der gleichen Größenordnung liegen, für Pflasterflächen mit höherem Fugenanteil die Versickerungskennwerte jedoch in einem deutlich höheren Maß schwanken.



Abbildung 12: Anfangs- und Endinfiltrationsraten für alte Pflasterflächen mit engen und mit weiten Fugen⁶³

Darüber hinaus hat Borgwardt aus den Ergebnissen der Infiltrationsmessungen Spitzenabflussbeiwerte abgeleitet (siehe Abbildung 13). Hierzu definiert er den Spitzenabflussbeiwert als Abflussquotient bei einer 15-minütigen Beregnung. Die

⁶³ abgeleitet aus Messdaten von Borgwardt



Abflussspende ergibt sich hierbei aus der Differenz der zugrunde gelegten Regenspende $r_{(15)}$ und der versickerbaren Regenspende $i_{(15)}$.^{64,65}

Abbildung 13: Spitzenabflussbeiwerte für verschiedene Flächenbefestigungen für eine 15-minütige Beregnung nach Borgwardt

Für eine Regenspende von 300 l/(s·ha), die entsprechend DIN 1986-100 häufig als Bemessungsgröße herangezogen wird, gibt Borgwardt je nach Alter und Art der Fläche im Mittel einen Wert zwischen 0,6 und 0,8 an. Bei wasserdurchlässigen Pflastersystemen, deren aufgeweitete Fugen oder Kammern mit groben Mineralstoffen verfüllt sind, empfiehlt er ohne Einschränkung bezüglich der Liegezeit der Fläche einen Abflussbeiwert von 0,4-0,6.

Dagegen ist bei begrünten Pflasterbelägen aufgrund des erhöhten Anteils an organischen und mineralischen Feinteilen sowie bei wassergebundenen Bauweisen aufgrund der dichten Lagerung seiner Auffassung nach von einem Abflussbeiwert von 0,9 auszugehen. Borgwardt hat nachgewiesen, dass wassergebundene Decken nicht das Versickerungsvermögen besitzen, das ihnen oftmals zugesprochen wird (siehe auch Abbildung 11). Der in der DIN 1986-100 (früher DIN 1986-2) ausgewiesene Spitzenabflussbeiwert von 0,5 für wassergebundene Flächen kann durch die Untersuchungen von Borgwardt in keinster Weise gestützt werden. Es zeigt sich vielmehr, dass sich wassergebundene Befestigungen aufgrund der Belastung des Mineralkörpers in der Verschleißschicht und der starken Verdichtung weitaus weniger durchlässig darstellen als Pflasterbauweisen.⁶⁶ Zu diesem Ergebnis kam bereits auch schon Floss im Jahre 1985.⁶⁷

⁶⁴ Spitzenabflussbeiwert nach Borgwardt: $\psi_S = (r_{(15)}-i_{(15)})/r_{(15)}$

⁶⁵ Die angegebenen Versickerungsraten und Abflussbeiwerte beziehen sich – wie im gesamten Kapitel 2.4 –auf die hydrologischen Vorgänge an der Oberfläche (ohne Drainageabflüsse).

⁶⁶ Borgwardt, S. (1994a) und Borgwardt, S. (1994b)

Borgwardts Ansicht über das Versickerungsvermögen begrünter Pflasterbeläge (s.o.) kann dagegen nicht geteilt werden. Flöter wie auch andere Autoren haben bspw. nachgewiesen, dass bei begrünten Fugen die Wasserdurchlässigkeit mit fortwährender Standzeit erhalten bleibt oder im Vergleich zum Ausgangszustand gar anwachsen kann.⁶⁸ Dem Bewuchs wird hierbei eine bodenauflockernde Wirkung durch Wurzelbildung zugesprochen.

Die Auswirkungen der Durchlässigkeit des Oberbaus bei wenig durchlässigem Untergrund auf die Tragfähigkeit einer Straßenkonstruktion und den Wasserhaushalt des Oberbaus waren Gegenstand eines zweijährigen Forschungsprojektes von Hanses et al..⁶⁹ An einem in einen Parkplatz integrierten Lysimeter wurden Messungen an einem (nicht näher beschriebenen) wasserdurchlässigen Pflasteraufbau bei natürlichem Witterungseinfluss als auch bei künstlicher Beregung (15-minütiger Regen mit r = 200 I/(s·ha)) durchgeführt. Während des zweijährigen Beobachtungszeitraumes war an der Testfläche weder durch natürliche noch durch künstliche Beregnung ein Oberflächenabfluss festzustellen. Es zeigte sich ferner, dass die meisten Niederschläge als Haftwasser im Oberbau gebunden werden und keinen Drainageabfluss auslösen. Im ungünstigsten Fall, wenn ein Niederschlag in den bereits gesättigten Oberbau eintritt, kommt es zu einem nahezu vollständigen Abfluss über die Drainagen. Dieser Abfluss wird jedoch gegenüber dem eines Abflusses auf versiegelter Fläche erheblich verzögert und hinsichtlich der Abflussspitze gedämpft. Die Reduktion des Durchflusses gegenüber dem bei versiegelter Oberfläche liegt für praktische Anwendungen etwa bei 5-20 % des Ausgangswertes, so dass nach Hanses et al. bei der Planung und Bemessung von Regenabflussleitungen für durchlässige Pflasterflächen von einem (Spitzen-)Abflussbeiwert in der Größenordnung 0,05 $\leq \psi \leq$ 0,20 ausgegangen werden kann. Die von Hanses et al. getroffene Abschätzung des Abflussbeiwertes wasserdurchlässiger Pflasterbeläge erscheint im Hinblick auf die sonstigen in der Literatur genannten Versickerungskennwerte sehr optimistisch. Inwiefern die untersuchte Testfläche einer nutzungsbedingten Verringerung der Versickerungsleistung unterliegt, geht aus den Untersuchungsergebnissen nicht hervor. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sich eine geringe Wasserdurchlässigkeit des Untergrundes nicht in dem Maße negativ auf das Versickerungsverhalten wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen auswirkt wie bislang allgemein angenommen wird.

Eine interessante Untersuchung wurde auch von Schramm und Münchow⁷⁰ im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Umweltforschungszentrums Leipzig-

⁶⁷ zitiert in Münchow, B. (1999) und in Binnewies, W. und Schütz, M. (1985)

⁶⁸ Flöter, O. (1996) zitiert in Flöter, O. (2006); ebenso Eppel, J. (2003)

⁶⁹ Hanses, U. et al (1999)

⁷⁰ Schramm, M. und Münchow, B. (1995), Breuste, J. et al (1996) und Münchow, B. (1999)

Halle⁷¹ durchgeführt. Hierbei wurden die hydraulisch-physikalischen Eigenschaften von neuen und gealterten Flächenbefestigungen messtechnisch untersucht. Im Stadtgebiet von Leipzig sowie der näheren Umgebung wurden 21 typische Flächenbeläge, u.a. Pflasterbeläge, wassergebundene Decken, Rasengitterbeläge sowie andere versickerungsaktive Pflasterbeläge, ausgewählt und analysiert.

Zur Bestimmung des Versickerungsverhaltens wurden aufwändige Beregnungsversuche mit einem Sprinklerinfiltrometer, dass sich von der Messmethodik deutlich von Doppelring- und Tropfinfiltrometern unterscheidet, vollzogen. Bei dieser Methode wird in der Regel eine vergleichsweise große Fläche (hier rd. 6 m²) beregnet; der entstehende Oberflächenabfluss wird abgesaugt und einem Messzylinder zugeführt. Mit einem Sprinklerinfiltrometer soll der Niederschlag-Abfluss-Vorgang den Autoren zufolge realitätsnäher nachgebildet werden als dies bspw. mit einem überstauend funktionierendem Doppelring-Infiltrometer möglich ist. Inwiefern sich die unterschiedlichen Methodiken auf die Größe der Messwerte auswirkt ist jedoch nicht genau bekannt. Schiffler geht allerdings davon aus, dass die mit einem Sprinklerinfiltrometer erhobenen Messwerte tendenziell deutlich geringer ausfallen können.⁷²

Die Beregnung der Testflächen erfolgte im Rahmen der Untersuchung von Schramm und Münchow jeweils einmal in trockenem Zustand über einen Zeitraum von rd. 60 Minuten bei konstanten Beregnungsintensitäten von 30-35 mm/h (ca. 80-100 l/(s·ha)). Eine Stunde nach Abschluss des ersten Beregnungsversuchs wurde ein zweiter Versuch bei höheren Intensitäten von rd. 70 mm/h (ca. 200 l/(s·ha)) angeschlossen (Nasslauf). Aus den Ergebnissen von Trockenund Nasslauf wurden u.a. belagsspezifische Anfangs- und Muldenverlusthöhen abgeleitet, Abflussbeiwerte bestimmt und Abflusskennwerte für nicht getestete Niederschlagsbelastungen abgeschätzt. Ein Großteil der weitergehenden Analysen und Interpretationen basiert jedoch auf der Anpassung der Versuchsergebnisse an den Ansatz von Horton (siehe Kap. 2.3.2), dessen Anwendbarkeit auf wasserdurchlässige Pflasterflächen keineswegs abgesichert ist.

Schramm und Münchow kommen bei der Interpretation ihrer Messergebnisse zu ganz ähnlichen Schlussfolgerungen wie Borgwardt und die Berliner Wasserwerke (s.o.) was das relative Versickerungsvermögen der unterschiedlichen Befestigungstypen im Vergleich untereinander, den prinzipiellen Infiltrationsverlauf und was den Zusammenhang zwischen der Liegezeit einer Flächenbefestigung und ihres Versickerungsvermögens anbelangt. Allerdings liegen die Messwerte von

⁷¹ heute: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ

⁷² nach Schiffler G. R. (1992), zitiert in Breuste et al. (1996)

Schramm und Münchow in der Größenordnung einer Zehnerpotenz unter den ansonsten in der Literatur dokumentierten Versickerungsraten.

Diese eklatante Differenz ist vermutlich auf die unterschiedlichen Methodiken bei der Erfassung des Oberflächenabflusses bzw. der Infiltrationsrate zurückzuführen (s.o.). Welche Methodiken dabei die zutreffenderen Werte liefern, kann nicht beurteilt werden. Insgesamt erscheinen jedoch die Messwerte von Schramm und Münchow mit mittleren Versickerungsraten von 10-25 l/(s·ha) bei gealterten Pflasterbelägen und von 20-150 l/(s·ha) bei neuen Belägen sehr gering, zumal für besonders versickerungsaktive Belagstypen wie Rasengittersteine und Rasenfugenpflaster im Neuzustand ebenfalls äußerst geringe Versickerungsraten von deutlich unter 50 l/(s·ha) gemessen wurden.

Für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit sind indessen die von Schramm und Münchow abgeleiteten Werte zum Interzeptionsvermögen sowie zum Muldenrückhalt der verschiedenen Flächenbefestigungen überaus interessant. Sie bestätigen in der Größenordnung die von Schmitt und Illgen (2001) empfohlenen Werte, ermöglichen aber auch die Anpassung der Verlustwerte bei einigen Befestigungstypen, bei denen Werte bislang nur geschätzt werden konnten. Die Messwerte von Schramm und Münchow sind zusammen mit einigen Ergebnisdarstellungen im Anhang enthalten.

Sehr aufwändige Langzeitversuche zum Abflussverhalten verschiedener Pflasterflächen wurden von der Fachhochschule Osnabrück auf einem eigens errichteten öffentlichen Parkplatz in Lingen (Ems) durchgeführt.⁷³ Der Parkplatz setzt sich aus 41 unterschiedlichen Testflächen mit einer Regelgröße von jeweils 42,5 m² zusammen. Dabei wurden die verschiedenen Pflasteraufbauten vergleichend bei unterschiedlichem Oberflächengefälle, unterschiedlicher Planumsausbildung und unterschiedlichen Baumaterialien für Fugenfüllung, Pflasterbettung und/oder Tragschicht über einen Zeitraum von rd. fünf Jahren untersucht. Integriert waren dabei fugenarme Pflasterbauweisen sowie verschiedene Beläge aus Sickerfugenpflaster und haufwerksporigem Betonpflaster. Neben der Untersuchung des Abflussverhaltens bei natürlicher Witterung wurden auch Messungen bei künstlicher Beregnung einzelner Testflächen mit verschiedenen Beregnungsintensitäten durchgeführt. Von den aufgezeichneten Niederschlagsereignissen wurden 39 ausgewertet.

Die Versuchsflächen lieferten selbst nach fünfjähriger Nutzungsdauer überraschend geringe Oberflächenabflüsse. Bei allen ausgewerteten Regenereignissen lag der Spitzenabflussbeiwert bei allen Testfeldern (meist deutlich) unter einem Wert von 0,50; in der Regel sogar unter 0,20. Lediglich bei drei Starkregenereig-

⁷³ Timmermann, U. (1998), (2000) und (2001)

nissen traten innerhalb der fünfjährigen Untersuchungsperiode Spitzenabflussbeiwerte zwischen 0,5 und 0,75 auf (z.B. bei einem Ereignis mit rd. 44 mm Niederschlagshöhe in rd. sechs Stunden). Für den mittleren ereignisspezifischen Abflussbeiwert wurden für alle Flächen stark variierende Werte ermittelt, die sich vorwiegend in der Größenordnung von 0-0,50 (überwiegend < 0,30) bewegen. Bei diesen Werten ist allerdings der Drainageabfluss des Planums zum Oberflächenabfluss hinzugerechnet worden.

Die künstliche Beregnung einzelner Testflächen erfolgte mehrfach für Intensitäten von 70 l/(s·ha), 100 l/(s·ha), 135 l/(s·ha), 200 l/(s·ha) sowie 300 l/(s·ha) jeweils für eine Dauer von 20 Minuten. Die aus den Messungen ermittelten Spitzenabflussbeiwerte bewegen sich für alle Versuchsflächen im Bereich zwischen 0 und 0,80. Aus den Beregnungsintensitäten \leq 100 l/(s·ha) resultieren dabei in der Regel Spitzenabflussbeiwerte < 0,40. Für die meisten Flächentypen lieferten erst Beregnungsintensitäten \geq 200 l/(s·ha) Spitzenabflussbeiwerte \geq 0,50.

Die Flächen mit einem geringeren Oberflächengefälle von 1% wiesen gegenüber den mit 2,5% Gefälle verlegten Flächen insgesamt meist geringere Oberflächenabflüsse auf – allerdings auch nicht durchgehend für alle Testfelder und /oder alle Regenereignisse. Die Differenz variierte dabei je nach Flächentyp und Niederschlagscharakteristik erheblich. Flächenbeläge mit geringeren Fugenanteilen lieferten in den meisten Fällen erwartungsgemäß tendenziell höhere Abflusswerte als Belagstypen mit größeren Fugenanteilen und entsprechend grobkörnigeren Fugenmaterialien. Das größte Infiltrationsvermögen wurde von Pflasterbelägen aus porösen Betonsteinen erzielt.

Die Untersuchungen der FH Osnabrück sind hinsichtlich der Bandbreite der untersuchten Belagstypen und Belagscharakteristika sowie der betrachteten Niederschlagsbelastungen die bislang umfangreichsten und messtechnisch aufwändigsten ihrer Art. Im Rahmen des damaligen Forschungsprojektes wurden wertvolle Daten zum Abflussaufkommen unter realen Nutzungsbedingungen zusammengetragen (wenn auch angesichts der Erhebung sämtlicher Messdaten an einem Ort von begrenzter Repräsentativität). Vermutlich aufgrund des begrenzten Projektbudgets wurden die Daten jedoch leider nicht vollständig ausgewertet. So blieb bspw. die Ermittlung zeit- und ereignisbezogener Versickerungsraten ebenso aus wie eine systematische Analyse der Daten auf Zusammenhänge zur Niederschlagshöhe sowie zu mittlerer und maximaler Regenintensität oder eine Auswertung hinsichtlich des Versickerungsverhaltens bei unterschiedlich langen Trockenperioden vor einem jeweiligen Ereignis. Zum Erkenntnisgewinn bezüglich der maßgeblichen Charakteristika des Infiltrationsvorganges auf versickerungsaktiven Flächenbefestigungen konnte die Untersuchung leider weniger beitragen als dies aufgrund der reichhaltigen Datenbasis durchaus möglich gewesen wäre.

Aus diesem Grunde werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die von Timmermann erhobenen und dem Autor zur Verfügung gestellten Abflussmessdaten einer erneuten Analyse unterzogen, die einen besonderen Fokus auf das bauartspezifische Versickerungsvermögen und seine Abhängigkeit von verschiedenen äußeren und baulichen Einflussfaktoren richtet (siehe Kapitel 3.4 und Kapitel 4.3).

Das Versickerungsvermögen von Rasenfugenpflaster wurde von Kolb und Leopoldseder im Rahmen einer Versuchsreihe der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau untersucht.⁷⁴ Dabei wurden Testflächen aus Kleinformatpflaster mit einer Fugenbreite von 3 cm und einem Fugenanteil von rd. 22% auf einem täglich genutzten Parkplatz errichtet und über mehrere Jahre auf ihre Versickerungsfähigkeit hin analysiert. Die einzelnen Versuchsfelder unterschieden sich durch die verwendeten Materialien zur Fugenfüllung sowie durch die unterschiedlichen Rasensaatmischungen. Die Versickerungsleistungen wurden mit Hilfe eines Tropfinfiltrometers gemessen. Zum Zeitpunkt der Messungen bestanden die Flächen bereits über zwei Jahre.

Die geringsten gemessenen Versickerungsraten lagen je nach Fugenmaterial und Saattyp zwischen 300 mm/h und 600 mm/h bzw. 830 l/(s·ha) und 1660 l/(s·ha). Damit liegt das Versickerungsvermögen des Rasenfugenpflasters deutlich über dem Versickerungsvermögen von Schotterrasenflächen, für welche die Autoren in früheren Untersuchungen an 21 Testflächen im Mittel eine Versickerungsleistung von 40,6 mm/h bzw. von rd. 110 l/(s·ha) festgestellt haben.⁷⁵ Diese Werte weichen dabei z.T. erheblich von den Ergebnissen von Dellwig ab (s.o.).

Darüber hinaus betrachteten Kolb und Leopoldseder den Verdichtungsgrad des Fugenmaterials verschiedener Pflastertypen nach zehnjähriger Nutzung. Ihre Untersuchungen ergaben, dass sich das Fugenfüllmaterial bei Kleinsteinpflaster im Laufe der Standzeit auf bis zu 100% der Proctordichte nachverdichtet. Bei Rasengittersteinen, Rasenziegeln, Böschungsplatten und Verbundpflaster liegen die Lagerungsdichten zwischen 70% und 80% der Proctordichte. Mit steigender Lagerungsdichte verringern sich das Gesamtporenvolumen sowie die Wasserleitfähigkeit entsprechend.

Ein umfangreiches Untersuchungsprogramm zum Versickerungsvermögen von wasserdurchlässigen Flächenbelägen nach mehrjähriger Betriebsdauer wurde auch von der Fachhochschule Bochum in Zusammenarbeit mit dem IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, durchgeführt. Nolting et al. haben hierbei untersucht, inwiefern sich die Infiltrationsleistung versickerungsstarker

⁷⁴ Kolb, W. und Leopoldseder, T. (2000)

⁷⁵ Kolb, W. und Frank, R. (1998)

Pflastersysteme im Laufe der Standzeit reduziert. Dabei wurde u.a. auch analysiert, ob der fachmännische oder private Einbau der Beläge eine Rolle auf das langjährige Versickerungsvermögen hat und ob zur Aufrechterhaltung der Funktionstüchtigkeit eine Reinigung der Beläge erforderlich ist.⁷⁶

Den Kern der Untersuchung bilden Versickerungsversuche mit Hilfe eines Tropfinfiltrometers. Laborversuche am IKT ergänzten das Untersuchungsprogramm, um gezielten Detailfragen wie bspw. den Auswirkungen von Einbaufehlern nachzugehen. Die in-situ-Messungen umfassten in erster Linie Tests an versickerungsstarken Pflastersystemen, die vom MUNLV im Rahmen der Maßnahme "Initiative ökologische und nachhaltige Wasserwirtschaft NRW" in hohem Maße finanziell gefördert wurden (Fördersumme rd. 20 Mio. €). An 24 Standorten wurden 49 Einzelversuche durchgeführt; davon 29 Versuche an Pflasterbelägen aus haufwerksporigen Betonsteinen, 17 Versuche an Pflasterbelägen aus Sickerfugensteinen und drei Versuche an Rasengitterbelägen. Die Liegezeit der untersuchten Flächen betrug zum Zeitpunkt der Messung vier bis zehn Jahre. Die Charakteristika des jeweiligen Pflastersystems sowie des Standortes wurden erfasst und flossen in die Auswertung der Messergebnisse ein (Alter, Nutzung und Zustand der Flächen etc.). An einer Vielzahl der untersuchten Flächenobjekte wurden zwei oder mehr Messungen durchgeführt, um bspw. den Einfluss von Vermoosung, augenscheinlicher Verschmutzung oder einer Vorsättigung des Belages quantifizieren zu können. Eine grafische Darstellung der Messergebnisse von Nolting et al. zeigt Abbildung 14.

Bei 90% der untersuchten Standorte fanden Nolting et al. Infiltrationsraten, die deutlich über dem von verschiedenen Richtlinien als Mindestwert geforderten Wert von 270 l/(s·ha) lagen und somit als ausreichend wasserdurchlässig bewertet werden konnten.⁷⁷ Dabei nahm bei den Versuchen die Versickerungsrate nicht, wie bei geringer durchlässigen Pflasterbelägen meist beobachtet, innerhalb der ersten Minuten deutlich ab, sondern verbleibt vielfach auf einem hohen Niveau von über 500 l/(s·ha). Damit bestätigen die Untersuchungen von Nolting et al. die bereits von anderen Autoren festgestellten hohen Infiltrationsraten von Pflasterbelägen aus haufwerksporigen Betonsteinen und Sickerfugensystemen.

An drei Standorten war das Versickerungsvermögen infolge Kolmation partiell auf Werte $\leq 100 \text{ l/(s}\cdot\text{ha})$ herabgesetzt. Bei zwei weiteren Standorten war die Infiltrationskapazität großflächig infolge von Vermoosung und Kolmation sowie infolge eines Einbaufehlers deutlich niedriger als 270 l/(s·ha). Die stichprobenartige Untersuchung bei trockenem und vorgenässtem Belag an zwei Objekten ergab,

⁷⁶ Nolting, B. et al. (2005)

⁷⁷ z.B. FGSV (1998) oder BDB (1996)

dass sich eine ausgeprägte Vorbefeuchtung in erheblichem Maße auf die Versickerungsleistung auswirken kann. Die bei trockenem Belag festgestellten Infiltrationsraten von > 1000 l/(s·ha) reduzierten sich in feuchtem Zustand in beiden Fällen auf Werte < 300 l/(s·ha).



Abbildung 14: Bandbreite der von Nolting et al. gemessenen Versickerungsraten für verschiedene Sickerfugenbeläge und Pflasterflächen aus haufwerksporigen Betonsteinen⁷⁸

Eine Vermoosung und Verschlämmung der Beläge wurde vermehrt in schattigen Bereichen vorgefunden und wirkt sich ebenfalls größtenteils reduzierend auf die Versickerungsleistung aus. Deutlich herabgesetzte Infiltrationsraten wurden zudem überwiegend in Bereichen mit verstärkter Verkehrsbelastung (Fahrspuren

⁷⁸ eigene Darstellung auf der Basis der dokumentierten Messergebnisse von Nolting et al. (2005); angegebene Zahlenwerte in Klammern geben die Zahl der Versuche zur jeweiligen Kategorie an

u.ä.) sowie in Bereichen, in denen feinkörniges Material von angrenzenden Flächen auf die Pflasterung getragen wird, gefunden. Dagegen konnte kein Unterschied im Versickerungsvermögen bei von Privatpersonen in Eigenleistung im Vergleich zu durch Fachfirmen verlegten Flächenbelägen festgestellt werden. Bei stichprobenartigen Versuchen an gereinigten Flächenbelägen konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass durch Reinigung die Wasserdurchlässigkeit eines Belages wieder erhöht werden kann.

Eine der jüngst veröffentlichten Untersuchungen zum hydraulischen Langzeitverhalten wasserdurchlässiger Flächenbeläge stammt von Flöter.⁷⁹ Er untersuchte das Abflussverhalten von drei Testflächen unter realen Nutzungsbedingungen über einen Zeitraum von rd. vier Jahren. Die Testflächen bestanden aus einer fugenarm verlegten Pflasterfläche, einem fugenarm verlegten Plattenbelag sowie einer wassergebundenen Decke aus Glensada. Die Testflächen waren als Lysimeter ausgebildet und enthielten umfangreiche Messtechnik zur Erfassung der Abflusskomponenten sowie zur Aufzeichnung von Wassergehalten und Saugspannungen innerhalb des Flächenaufbaus. Darüber hinaus führte Flöter zahlreiche ergänzende Untersuchungen im Labor durch.

Flöter liefert mit seiner Arbeit wertvolle Erkenntnisse zu den bodenhydraulischen Prozessen während des Infiltrationsvorganges auf gering wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen. Darüber hinaus dokumentierte er die Veränderungen, welche die Fugen-, Bettungs- und Tragschichtmaterialien von der Errichtung der Fläche über die nächsten Jahre durchlaufen.

Die Veränderung der Körnungsstruktur, die bspw. bei der Pflasterfläche eine Abnahme der mittleren Infiltrationsrate von 2,2·10⁻² auf 4,3·10⁻³ m/s bewirkt, wurde bereits von Borgwardt nachgewiesen. Flöter konnte darüber hinaus zeigen, dass sich auch in der Bettungsschicht der Schluffanteil erhöht; dies allerdings nur vergleichsweise geringfügig. Dagegen fand über einen Zeitraum von rd. vier Jahren keine Einschlämmung von feinerem Material aus den Fugen und der Bettungsschicht in die Tragschicht statt.

Aufgrund der umfangreichen Messtechnik in den Lysimeteranlagen war es Flöter möglich, fortlaufend die wesentlichen, den Strömungsvorgang beeinflussenden Kenngrößen wie Matrixpotenzial, Saugspannung und Wassergehalt zu bestimmen. Dadurch konnte er zeigen, dass sich bei Regen zunächst die Mittel- und Feinporen des Fugenmaterials auffüllen müssen, bevor das Wasser in die Bettungsschicht abfließen kann. Bei geringem Wassergehalt ist die (ungesättigte) hydraulische Leitfähigkeit des Fugenmaterials dabei deutlich geringer als bei höheren Sättigungsgraden, da der potenzielle Fließquerschnitt der Grobporen

⁷⁹ Flöter, O. (2006)

nicht am Strömungsvorgang teilnimmt. Dies kann dazu führen, dass die Infiltrationsrate bei schwächeren Niederschlägen geringer ist als bei Regen höherer Intensität, die entsprechend höhere Sättigungsgrade hervorrufen. Dieser Effekt findet sich auch in den Messwerten von Timmermann sowie der Berliner Wasserwerken wieder. Leider liefert Flöter hierzu keine konkreten Messwertanalysen sowie weitergehende Erörterungen. Indessen führt Flöter weiter aus, dass trotz der schmalen Fugenkanäle und der insgesamt geringeren Fugenanteile das Fugenmaterial wie der Pflasteraufbau insgesamt aufgrund des hohen Anteils an Grobporen zu keinem Zeitpunkt während seiner Untersuchung vollständig Wasser gesättigt war.

Nach dem Durchströmen des Fugenmaterials verteilt sich ein Teil des Wassers zunächst lateral in der Pflasterbettung, bevor es anschließend vertikal in die Tragschicht einsickern kann, während ein anderer Teil direkt lotrecht die Bettungsschicht durchströmt und in die Tragschicht einsickert. Der Wassergehalt in der Tragschicht nimmt dabei von der Bettung bis zur Unterkante der Tragschicht tendenziell zu. Im Mittel betrug der Wassergehalt bei Flöter 19 Vol.-% an der Oberkante und 28 Vol.-% an der Unterkante der Tragschicht.

Die geringe ungesättigte Wasserleitfähigkeit der grobkörnigen Baumaterialen bedingt sehr geringe Evaporationsraten aus dem Oberbau in die Atmosphäre. Dies wird noch dadurch begünstigt, dass das Fugenmaterial unterhalb der Oberkante der Deckschicht vergleichsweise windgeschützt in die Steine eingebettet liegt. Lediglich in den ersten 1-2 cm des Fugenmaterials erfolgt eine Austrocknung, die aber an dieser Stelle die Wasserleitfähigkeit wiederum herabsetzt. Flöter ermittelte die Evaporation von der Pflasterfläche zu rd. 8% des Niederschlagsvolumens, wobei allein 6% aus der Abtrocknung der benetzten Steinoberflächen herrührt. Im Sommer ist dabei die Evaporation mit rd. 14% deutlich höher als in den Wintermonaten (rd. 3%).

Für die Pflasterfläche ermittelte Flöter einen Gesamtabflussbeiwert von 0,12 bezogen auf die Jahresniederschlagshöhe. Der maximal bei einem Regenereignis verzeichnete Spitzenabflussbeiwert betrug 0,73. Der geringe Jahresabflussbeiwert resultiert u.a. daher, dass bei der Vielzahl der intensitäts- und/oder volumenschwachen Niederschlagsereignisse die Oberfläche lediglich benetzt oder die Grobporen im Flächenaufbau gefüllt wurden, ohne dass ein Oberflächenabfluss auftritt. Bei der Pflasterfläche setzte zu Beginn sowie zum Ende seiner Untersuchungen Oberflächenabfluss bei einer Regenintensität von 0,16 mm/min bzw. bei 0,12 mm/min ein.

In Deutschland liegen bislang sehr wenig Erkenntnisse zum Infiltrationsvermögen von porös ausgebildeten Flächenbefestigungen, die vollflächig und fugenlos vergossen werden, wie bspw. Dränasphalt (z.B. Flüsterasphalt) sowie poröse Beton- und Kunststoffdecken vor. An dieser Stelle werden daher von Bean und Hunt in den USA gewonnen Erkenntnisse angeführt, die umfangreiche Feldmessungen an porösen Beton- und Asphaltdecken sowie an Rasengittersteinen und Sickerpflasterbelägen durchgeführt haben.⁸⁰ An über 50 Standorten wurde die Versickerungsleistung von neuen und gealterten Flächenbelägen mit Hilfe eines Doppelring-Infiltrometers untersucht, wobei jeder Messpunkt dreifach beprobt wurde.

Für Deckschichten aus porösem Beton fanden Bean und Hunt z.T. trotz langjähriger Liegezeiten enorme Versickerungsleistungen, die für die meisten Testflächen bei Werten weit über 300 l/(s·ha) lagen; bei der Hälfte der Messungen gar über 10.000 l/(s·ha). Die Messungen an porösen Asphaltdecken lieferten dagegen geringere Versickerungsraten, die sich vorwiegend im Bereich von 100-400 l/(s·ha) bewegten. Versickerungsversuche an relativ neuen Pflasterbelägen mit splittgefüllten Sickerfugen und -kammern, jedoch mit einer Liegezeit von lediglich 1-2 Jahren, ergaben ebenfalls sehr hohe Messwerte mit Infiltrationsraten fast ausschließlich deutlich über 1000 l/(s·ha). Nur an drei Standorten wurden hier Werte von 50-220 l/(s·ha) vorgefunden. Für Rasengitterbeläge fanden Bean und Hunt Versickerungsraten, die in der Größenordnung der Messwerte der o.g. Untersuchungen aus Deutschland liegen. Die mittlere Versickerungsrate je Versickerungsversuch lag hier im Mittel aller Versuche bei 300 l/(s·ha), wobei insgesamt Werte zwischen 30 l/(s·ha) und 1.600 l/(s·ha) gefunden wurden.⁸¹

Bilanz der Literaturrecherche

Das vorliegende Kapitel gibt den bisherigen Kenntnisstand zum Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger Befestigungsraten wieder. Die zitierten Untersuchungen wurden überwiegend in Deutschland durchgeführt und repräsentieren damit auch die in Deutschland gültigen bautechnischen Anforderungen. Auf die Schilderung von im Ausland gewonnenen Erkenntnissen wurde hier bewusst verzichtet. Es kann jedoch angemerkt werden, dass auch die in der internationalen Fachliteratur dokumentierten Untersuchungen von einer ähnlichen Bandbreite des Versickerungsvermögens berichten und keine weiter gehenden Erkenntnisse zum spezifischen Versickerungsprozess auf Pflasterflächen liefern.⁸²

⁸⁰ Hunt, W. F. III und Bean, E. Z. (2006)

⁸¹ alle angegebenen Werte beziehen sich auf Mittelwerte, die aus den in i.d.R. drei Testläufen ermittelten mittleren Versickerungsraten je Versuch, gebildet wurden; die Testflächen waren zum Zeitpunkt der Messungen i.d.R. 2-10 Jahre in Betrieb und werden vorwiegend als Parkplatz genutzt

 ⁸² z.B. Ferguson, B. K. (2005); Brattebo, B.O. und Booth, D.B. (2003); Gerrits, C. und James, W. (2002); Hunt, W. F. et al. (2002); Kresin, C. (1996), Pratt, C. J. et al. (1995); Sztruhar, D. und Wheater, H.S. (1993); Hade, J.D. und Smith, D.R. (1988); Suda, S. et al. (1988); Smith D.R. (1984) oder Field R. et al. (1982)

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. In Tabelle 7 ist die Bandbreite der in den verschiedenen o.g. Untersuchungen festgestellten Versickerungsraten nochmals zusammengefasst.

Tabelle 7:Bandbreite des in der Fachliteratur angegebenen Versickerungsvermö-
gens 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)

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 dieser Arbeit dar.

Die in den zitierten Untersuchungen beobachteten Versickerungsleistungen der unterschiedlichen Befestigungstypen sind vielfach beachtlich hoch. Überwiegend übersteigen sie damit das Versickerungsvermögen, das ihnen die technischen Regelwerke zur Entwässerungsplanungen bislang zusprechen.

Andererseits wurden stellenweise auch ausgesprochen geringe Infiltrationsleistungen gemessen – selbst bei Flächenbelägen, die als besonders versickerungsfähig gelten (bspw. Sickerfugen- oder Porenbetonpflaster). Das Versickerungsvermögen war hier insbesondere infolge des Eintrages von Feinpartikeln in den Fugenraum erheblich herabgesetzt. Es zeigt sich, dass das Versickerungsvermögen eine ausgeprägte Variabilität aufweist und von einer Vielzahl an Randbedingungen beeinflusst werden kann. Hierzu gehören die Nutzung und die Liegezeit einer Fläche, die Niederschlagsbelastung, aber auch bauliche Randbedingungen wie der Fugenanteil, das verwendete Fugenmaterial und das Oberflächengefälle eines Pflasteraufbaus. Eine quantitative Bewertung der verschiedenen Randbedingungen ist jedoch bislang ebenso wenig möglich wie eine Eingrenzung des stochastisch geprägten Versickerungsverhaltens über statistische Kennwerte. Mit dieser Arbeit wird versucht, diese bestehenden Kenntnisdefizite abzubauen.

TEIL B

ANALYSE DES VERSICKERUNGS-VERHALTENS

3 Vorgehensweise und Methodik der Datenanalyse

3.1 Methodischer Ansatz und Systematik der Untersuchung

Im Rahmen der Gesamtuntersuchung sollen umfassende, fundierte und detaillierte Erkenntnisse zum physikalischen Phänomen der Abflussbildung auf versickerungsfähig ausgebildeten Flächenbelägen gewonnen werden. Hierzu wurde in einem ersten Bearbeitungsschritt der bisherige Kenntnisstand zum Versickerungsvermögen durchlässig befestigter Siedlungsflächen zusammengetragen und in Kapitel 2 ausführlich erörtert. Dieser Kenntnisstand stellt die Basis und den Startpunkt für die eigenen eingehenden Untersuchungen des Versickerungsverhaltens verschiedener Belagstypen dar.

Zur detaillierten Analyse des Versickerungsverhaltens wasserdurchlässiger Pflasterbeläge wurde ein sehr breit ausgerichteter Forschungsansatz gewählt, der vielfältige wissenschaftliche Methoden kombiniert. Den Kern der Untersuchung bildet ein eigenes Messprogramm, bei dem das Abfluss- und Versickerungsverhalten sowohl mit Hilfe von Feldmessungen an Bestandsflächen als auch anhand von Lysimeterversuchen im Labor systematisch untersucht wird. Die eigenen Messdaten werden durch extern erhobene Messdaten an Bestandsflächen sowie Simulationsergebnisse eines detaillierten bodenhydraulischen Berechnungsmodells ergänzt. Das Grundschema des methodischen Forschungsansatzes mit den betrachteten Pflastertypen, den angewandten Untersuchungsmethoden sowie deren jeweiligen Zielsetzungen ist in Abbildung 15 dargestellt.

Die Untersuchung umfasst ein breites Spektrum wasserdurchlässiger Pflasterbauweisen, wobei ein besonderer Fokus auf gering bis mäßig durchlässigen Pflasterbelägen liegt. Konventionelle Pflastersysteme wie fugenarme Platten- und Verbundpflasterbeläge sind die mit Abstand dominierenden Arten wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen (vgl. Kapitel 2.1). Sie sind wegen ihres vergleichsweise begrenzten Versickerungsvermögens im Hinblick auf die Dimensionierung von Entwässerungssystemen von weitaus höherer Relevanz als besonders versickerungsstarke Ökopflasterbeläge. Dennoch fanden sie im Rahmen messtechnischer Untersuchung bislang nur wenig Beachtung, sodass bezüglich ihres Versickerungsvermögens ein ausgeprägtes Kenntnisdefizit herrscht.

	METHODISCHER ANSATZ					
Pflastertypen	Platten- beläge	Rechteck- und (konve	Verbundpflaster entionell)	Sickerfugen- pflaster	Porenbeton- pflaster	Rasengitter- beläge
+ Fugenweite	3-5 mm	3-5 mm	6-10 mm	> 4 mm	3-5 mm	- -
+ Fugenanteil	0,5-2%	3-6%	6-12%	10-30%	3-6%	> 35%
+ Fugenmaterial	Sand	Sand	Sand	Splitt	Sand	Boden/Splitt
Fokus	Versickerui stat. Kennwe	ngsvermögen rte & Variabilität		phänomenolog Infiltrationsprozess	gische Analyse	
Untersuchungs- methodik	Feldmessung Infiltromete	gen an Bestandsfl er- u. Abflussmessunge	ächen Lysim ^{en Nei}	Lysimeterversuche im Labor Numerische Sin Neu- und Gebrauchszustand Verifikation + Erg		
Datenquelle	externe Da	aten	eiger	ne Erhebungen &	Simulationen	

Abbildung 15: Methodischer Forschungsansatz zur Analyse des Versickerungsverhaltens wasserdurchlässiger Pflasterflächen⁸³

Die Analyse des Versickerungsverhaltens der diversen Belagsraten erfolgt in zwei übergeordneten Untersuchungsschritten. In einem ersten Arbeitsschritt wurden Kennwerte des Versickerungsvermögens im Gebrauchszustand gesammelt und analysiert. Hierbei stand die Generierung und Auswertung einer möglichst großen Datenbasis im Vordergrund, die eine Quantifizierung der Versickerungsleistungen nach mehrjähriger Nutzung sowie insbesondere eine Quantifizierung der Variabilität des Versickerungsvermögens ermöglichen sollte. Hierzu wurden rd. 90 eigene Messungen an Bestandsflächen durchgeführt, die Messergebnisse zusammen mit externen Messdaten in einem Datenpool zusammen gefasst und statistisch ausgewertet.

Ein zweiter Untersuchungsschritt widmet sich der Analyse und Charakterisierung des physikalischen Phänomens der Versickerung auf Pflasterflächen (phänomenologische Analyse). Hierzu wurden an verschiedenen Belagstypen rd. 140 Beregnungsversuche an einem Lysimeter im Labor durchgeführt. Die Versuche dienen in erster Linie dazu, den Einfluss wesentlicher Randbedingungen wie Regenintensität, Oberflächengefälle und Kolmationsgrad auf das Versickerungsverhalten systematisch zu untersuchen und zu quantifizieren. Die im Labor untersuchten Flächenbeläge sind vielfach baugleich zu Flächenbelägen, die im Rahmen der Feldmessungen beprobt wurden. Durch die direkte Verknüpfung von Messungen in situ mit Messungen im Labormaßstab, die klar definierte und reproduzierbare Randbedingungen aufweisen, wird versucht, gleichermaßen realitätsnahe wie repräsentative Ergebnisse zu erzielen, die eine qualifizierte Analyse der wesentlichen Einflussfaktoren auf das Versickerungsvermögen ermöglichen.

⁸³ Die einzelnen Untersuchungsschritte und -methodiken erstrecken sich über das gesamte genannte Flächenspektrum.

Zur Ergänzung der phänomenologischen Analyse wurden die durchgeführten Lysimeterversuche in einem numerischen Berechnungsmodell nachgebildet. Hierzu wurde das Programm HYDRUS-2D, ein detailliertes Finite-Elemente-Modell zur Berechnung von Wasser-, Wärme- und Stofftransportvorgängen in porösen Medien, anhand der Messdaten der Beregnungsversuche kalibriert. Neben der Plausibilitätsprüfung der Messdaten ermöglicht die Modellanwendung die Betrachtung und Analyse zusätzlicher Szenarien, die nicht im Labor untersucht werden konnten. Die Modellanwendung trägt auf diese Weise zur Qualitätssicherung der Laborversuche, zur Vergrößerung der Datenbasis sowie zum Verständnis der Prozesse innerhalb der Pflasterkonstruktionen entscheidend bei.

Die einzelnen Arbeitsschritte und Methoden werden nachfolgend kurz beschrieben und erörtert.

3.2 Infiltrationsversuche an Bestandsflächen

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 dienen die Messergebnisse ferner als wichtige Referenzwerte, um verschiedene Kolmationsgrade nachfolgend auch im Rahmen der Laborversuche adäquat nachbilden zu können.

Die Messungen wurden mit Hilfe eines Tropfinfiltrometers durchgeführt, bei dem über einen kapazitiven Abstandssensor die Beregnungsintensität dem aktuellen Infiltrationsvermögen entsprechend gesteuert wird. Die Beregnungseinheit besteht aus einem Plexiglasbehälter mit rd. 600 Injektionsnadeln an der Unterseite, die eine natürlichen Regenereignissen ähnliche Tropfencharakteristik sicherstellen sollen. Die Testfläche hat eine Größe von ca. 0,25 m² (\emptyset rd. 54 cm) und wird durch einen aufzementierten Stahlring wasserdicht eingefasst. Beregnet wird eine etwa doppelt so große Fläche von 75 cm x 75 cm, um eine laterale Ausbreitung des einsickernden Wassers unterhalb der Oberfläche zu unterbinden.

Der sich innerhalb des Stahlrings auf der Oberfläche bildende Wasserfilm wird durch die Steuerung der Pumpen mit Hilfe des Abstandssensors auf wenige Millimeter begrenzt. Die Infiltrationsrate selbst wird nicht gemessen, sondern lediglich der Zustrom zur Beregnungseinheit. Dies erfolgt über ein gedükertes Durchflussmessgerät, das zwischen dem Wasserbehälter und der Beregnungseinheit angeordnet ist. Mit dem Tropfinfiltrometer können Beregnungen mit Intensitäten von bis zu 800 l/(s·ha) allein über die Injektionsnadeln simuliert werden. Höhere Intensitäten von bis zu rd. 3300 l/(s·ha) können durch die Öffnung eines zusätzlichen Ventils an der Unterseite der Beregnungseinheit erreicht werden.

Das im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verwendete Tropfinfiltrometer ist baugleich mit dem Gerät, das Nolting et al. in ihrem Messprogramm verwendet haben und ähnelt den Infiltrometern, die in anderen Untersuchungen benutzt wurden (z.B. von Kretzer et al., Borgwardt sowie Kolb et al.). Eine ausführliche Beschreibung des Gerätes findet sich im Abschlussbericht des Forschungsprojektes von Nolting et al..⁸⁴ Eine erläuternde Abbildung findet sich darüber hinaus im Anhang der vorliegenden Arbeit (Abbildung A - 7).

Im Rahmen der Untersuchung wurden 21 Infiltrometertests auf sechs unterschiedlichen Pflastersystemen durchgeführt. Eine Übersicht der untersuchten Pflasterbeläge sowie die wesentlichen Flächencharakteristika sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Die Messungen umfassen Flächenbeläge aus herkömmlichem Betonpflaster mit Fugenweiten von 3-4 mm sowie mit einer Fugenweite von rd. 10 mm, zwei verschiedene Beläge aus fugenarm verlegtem Porenbetonpflaster⁸⁵, einen Verbundpflasterbelag mit splittgefüllten Sickeröffnungen sowie einen fugenarmen Pflasterbelag aus gefügedichten Sickerfugensteinen mit horizontal und vertikal verlaufenden Sickerkanälen. Hierbei wurde jeder Belag an mehreren Stellen in der Örtlichkeit beprobt.

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 Timmermann⁸⁶ ihre Langzeituntersuchungen durchgeführt hat (siehe Kapitel 2.4 und Kapitel 3.4).

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

⁸⁴ Nolting et al. (2005)

⁸⁵ an einem Messpunkt auch mit einer größeren Fugenbreite von 25 mm

⁸⁶ Timmermann, U. (1998), (2000) und (2001)

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 + Schulhof (2) + vermooster 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)

Tabelle 8:	Übersicht der	Untersuchungsflächen	der Infiltrom	etermessungen ⁸⁷
------------	---------------	----------------------	---------------	-----------------------------

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

Zur Unterfütterung der 21 detaillierten Versickerungsversuche mittels Tropfinfiltrometer wurden 71 weitere Versickerungsversuche auf dem Campusgelände der Technischen Universität Kaiserslautern unter Anwendung der vereinfachten Messmethode mittels Doppelring-Infiltrometer durchgeführt. Bei dieser Messmethode werden zwei Stahlringe (hier: Ø 60 cm und Ø 100 cm) auf die Untersuchungsfläche aufzementiert, wenige Zentimeter mit Wasser befüllt (hier i.d.R. 3 cm) und über die händische Messung der Wasserstandshöhe die aktuelle Versickerungsrate fortlaufend bzw. für verschiedene Zeitpunkte während eines Versuches ermittelt. Der äußere Ring dient dazu, eine rein vertikale Strömungsrichtung innerhalb des inneren Ringes zu gewährleisten.

Die Messmethode ist wegen des Überstaus der Testfläche um einige Zentimeter und der manuellen Ablesung des Wasserstandes insgesamt etwas ungenauer als die Messung mittels Tropfinfiltrometer. Dennoch ermöglicht sie, insbesondere

⁸⁷ Orte: Lingen/Ems (Niedersachsen); Gelsenkirchen, Straelen und Kevelaer (NRW)

beim relativen Vergleich verschiedener auf diese Weise beprobten Messpunkte, eine Aussage zur Größenordnung des Versickerungsvermögens einer Testfläche.

Die 71 mittels Doppelring-Infiltrometer vollzogenen Versickerungsversuche dienten primär der Evaluierung der kleinräumigen und zeitlichen Variabilität des Versickerungsvermögens. Sie verteilen sich auf 49 unterschiedliche Messpunkte an acht Standorten mit fünf unterschiedlichen Belagstypen. Eine Übersicht der auf diese Weise untersuchten Pflasterbeläge ist zusammen mit den wesentlichen Flächen- und Messpunktcharakteristika in Tabelle 9 aufgeführt.

Ort	Belagstyp	Fugen- weite	Fugen- material	Nutzung	Messpunkte	
TU KL (vor Geb. 67)	gefügedichtes Betonver- bundpflaster	4 mm (rd. 5%)	Sand	Parkplatz	Stellplatzmitte (5) Fahrspur (5) Eingangsbereich (5) Randbereiche (3) Sonstige (3)	
TU KL (vor Geb. 14)	gefügedichtes Betonver- bundpflaster	3-4 mm (rd. 4,5%)	Sand	Parkplatz	Stellplatzmitte (8) Fahrspur (8) Randbereiche (3)	
TU KL (vor Geb. 14)	Porenbetonpflaster	4 mm (rd. 5%)	Sand	Fußweg an Parkplatz	Gehwegmitte (3) Randbereich (2)	
TU KL (neben Geb. 14)	gefügedichtes Betonver- bundpflaster	4 mm (rd. 4,5%)	Sand	Parkplatz	Stellplatzmitte (3) Fahrspur (5)	
TU KL (zw. Geb. 13/14)	gefügedichtes Rechteck- Betonpflaster	4 mm (rd. 4,5%)	Sand	Gehweg	Gehwegmitte (6) überdacht (2)	
TU KL (zw. Geb. 13/14)	Rasengitterbelag	 (rd. 35%)	Boden + Rasen	Gehweg / FW-Zufahrt	Zentrum Fläche (3)	
TU KL (zw. Geb. 13/14)	Kleinmosaikpflaster	 (rd. 25%)	Boden + Rasen	Gehweg	Zentrum Fläche (5)	
TU KL (neben Geb. 14)	Plattenbelag (30x30 cm)	3-10 mm (4-8%)	Sand	Gehweg	Gehwegmitte (4)	
Fugenweite: Werte in Klammern geben den Fugenanteil einschließlich Sickerkammern an.						

Tabelle 9: Übersicht der mittels Doppelring-Infiltrometer beprobten Untersuchungsflächen⁸⁸

Messpunkte: Werte in Klammern geben die Anzahl der Einzelversuche an.

Der Großteil der Messungen wurde auf Parkplatzflächen aus konventionellem, fugenarmen Rechteck- oder Verbundpflaster durchgeführt. Darüber hinaus wurden Beläge aus Kleinbetonplatten, Porenbetonpflaster, Rasengittersteinen

⁸⁸ TU KL: Technische Universität Kaiserslautern

sowie Kleinmosaikpflaster untersucht. Einige der Messungen wurden zu verschiedenen Zeitpunkten und bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen auf jeweils gleichen Messpunkten wiederholt.

3.3 Statistische Analyse des Infiltrationsvermögens

Das Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger Flächenbeläge war Gegenstand verschiedener Forschungsvorhaben der vergangenen Jahre. Die wesentlichen Ergebnisse sowie der damit verbundene Erkenntnisgewinn dieser Untersuchungen sind in Kapitel 2.4 geschildert. Die in Tabelle 7 zusammengestellten Spannweiten des Versickerungsvermögens dokumentieren den enormen Wertebereich, in dem die Versickerungsleistungen der einzelnen Flächentypen nach mehrjähriger Nutzung schwanken können. Aussagen über die Eintretenswahrscheinlichkeit bestimmter Versickerungsleistungen vermag jedoch keine der Untersuchungen zu liefern, da der Umfang an untersuchten Flächenbelägen stets für eine qualifizierte statistische Analyse zu gering war.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird versucht, den stochastischen Charakter des Versickerungsvermögens verschiedener Belagsarten erstmalig über belastbare statistische Kenngrößen zu beschrieben. Hierzu wurden Messdaten verschiedener externer Untersuchungen gesammelt, gesichtet, systematisiert und aufbereitet. Die externen Messdaten wurden anschließend mit den eigenen Messdaten (Kapitel 3.2) in einer Datenbank zusammengeführt und statistisch ausgewertet.

Die statistische Analyse soll in erster Linie dazu dienen, für die unterschiedlichen Befestigungsarten die Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmter Versickerungsraten einzugrenzen und der Größenordnung nach zu bestimmen. Auf diese Weise soll eine Grundlage geschaffen werden, der starken Variabilität des Versickerungsvermögens wasserdurchlässiger Siedlungsflächen im Rahmen entwässerungstechnischer Planung besser als bislang Rechnung tragen zu können. Darüber hinaus soll der Einfluss verschiedener äußerer und baulicher Randbedingungen wie bspw. Alter, Nutzung, Verkehrsbelastung, Fugenanteil oder Körnung des Fugenmaterials auf die Infiltrationsleistung näher untersucht und soweit möglich quantifiziert werden. Neben den selbst erhobenen Daten setzt sich der Datenpool v.a. aus Messdaten aus den Untersuchungen von Borgwardt⁸⁹, Nolting et al.⁹⁰, Hunt und Bean⁹¹ sowie aus einer jüngeren, bislang unveröffentlichten Untersuchung der Ruhr-Universität Bochum⁹² zusammen. Darüber hinaus sind vereinzelte in der internationalen Fachliteratur dokumentierte Messdaten in den Datenpool eingeflossen. Bei allen Untersuchungen wurden die Versickerungsleistungen mit vergleichbaren Messmethoden aufgenommen (Tropf- oder Doppelring-Infiltrometer) und sowohl die beprobten Flächen als auch die Messergebnisse sehr gut dokumentiert. Auf die Integration weniger gut dokumentierter oder über andere Messmethoden erhobene Daten wurde bewusst verzichtet. Hier wurde der nachvollziehbaren Qualität der Daten der Vorzug vor der Generierung eines möglichst großen Datenumfanges gegeben. Dennoch umfasst die zusammengetragene Datenbasis mit 350 Datensätzen einen um ein Vielfaches größeren Datenumfang als alle bekannten Untersuchungen für sich. Eine Zusammenstellung der je Flächenkategorie verfügbaren Datensätze enthält Tabelle 10.

Flächentyp	Anzahl Datensätze
fugenarmes Normalpflaster (Fugenweite 3-5 mm)	162
Normalpflaster mit aufgeweiteten Fugen (Fugenweite > 6 mm)	25
spezielle Sickerfugenbeläge mit Kammern und Öffnungen	35
fugenarmes Porenpflaster (Fugenweite < 5 mm)	45
Rasengittersteine o.ä.	39
Porenbeton (fugenlos vergossen)	11
Porenasphalt (fugenlos vergossen)	5
wassergebunde Decke	6
Sonstige	22

 Tabelle 10:
 Anzahl der je Flächentyp in der Datenbasis enthaltenen Datensätze

Neben den gemessenen Versickerungsraten wurden für jeden Datensatz die Charakteristika der beprobten Flächen sowie der Versuchsbedingungen – soweit sie durch die Prüfer erhoben und entsprechend dokumentiert wurden – erfasst.

⁸⁹ Borgwardt, S. (1995)

⁹⁰ Hunt, W. F. III und Bean, E. Z. (2006)

⁹¹ Nolting et al. (2005)

⁹² Lehrstuhl für Verkehrswegebau (Prof. Krass und Prof. Radenberg); Forschungsprojekt "Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von Pflasterflächen"; Krass et al. (2007)

Dabei wurden insgesamt 22 Kennwerte und Charakteristika zu Aufbau, Zustand, Nutzung und Standort des jeweiligen Messpunktes in die Datenbank eingepflegt. Darüber hinaus wurden die jeweiligen Versuchsbedingungen sowie einige Zusatzinformationen registriert. Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der in der Datenbank enthaltenen Kenngrößen.

Das Versickerungsvermögen einer beprobten Fläche bzw. eines Messpunktes wird durch die gemessenen Versickerungsraten zu verschiedenen Zeitpunkten des jeweiligen Versuches charakterisiert: nach 10 Minuten, 20 Minuten, 30 Minuten sowie am Versuchende nach rd. 60 Minuten. Dabei sind sowohl die aktuellen Messwerte zum jeweiligen Zeitpunkt als auch die fortlaufenden Mittelwerte über die Versuchsdauer in der Datenbank abgelegt.

Die Zuordnung der verschiedenen Flächencharakteristika zu den gemessenen Versickerungsraten ermöglicht prinzipiell die Auswertung jedes einzelnen Charakteristikums hinsichtlich möglicher Korrelation zum Versickerungsvermögen eines bestimmten Pflastertyps. Durch den Bezug zu einer ausreichend großen Datenbasis können ggf. vorhandene Einflüsse und Zusammenhänge identifiziert und statistisch belegt werden, obgleich das gemessene Versickerungsvermögen stets das Ergebnis vielfältiger äußerer Einflüsse ist. Hierzu ist jedoch nicht bei allen enthaltenen Belagstypen ein ausreichender Datenumfang gegeben (vgl. Tabelle 10).

Für konventionelle fugenarm verlegte Pflasterflächen, die auch im Vordergrund der Gesamtuntersuchung stehen, liegt mit 162 Messdatensätzen die mit Abstand größte Datenmenge vor. Der vergleichsweise große Stichprobenumfang ermöglicht für diesen Belagstyp besonders aussagekräftige und belastbare Ergebnisse und erlaubt zudem eine weiter differenzierte Auswertung der Messdaten nach verschiedenen Flächencharakteristika. Der Datenbasis für diesen Flächentyp wird eine hohe Repräsentativität zugesprochen, da sie Messpunkte vielfältiger Flächennutzungen und Nutzungsdauern umfasst. Bei anderen Flächentypen reicht der Datenumfang aus, erste Häufigkeitsverteilungen des Versickerungsvermögens zu generieren und generelle Tendenzen zwischen verschiedenen Einflussgrößen und dem Versickerungsvermögen zu eruieren (fugenreiches Normalpflaster, Sickerfugenpflaster, Porenpflaster, Rasengitterbeläge).

Die Auswertung der aggregierten Messdaten erhebt dabei lediglich den Anspruch, ein erstes – bislang nicht vorhandenes – Bild der stochastischen Verteilung des Versickerungsvermögens unterschiedlicher Belagsarten zu zeichnen und die Variabilität in den Versickerungsleistungen mit einfachen statistischen Kennwerten der Größenordnung nach zu quantifizieren. Die unmittelbare Überlagerung der Messergebnisse verschiedener Untersuchungsreihen ist daher sachlich gerechtfertigt und dient dem Erkenntnisgewinn.

		Kategorie	Kat. 1 - 12
FLACHENTYP	FLACHENTYP	Beschreibung	
	DECKBELAG	Gefälle	[%]
		Belagdicke	[cm]
		Fugenweite	[mm]
		Fugenanteil	[%]
	CHARAKTERISTIKA FUGEN	Fugenmaterial	Freitext
FLÄCHEN-		Fugenkörnung	[mm]
AUFBAU		Bettungsmaterial	Freitext
	CHARAKTERISTIKA BETTUNG	Bettungskörnung	[mm]
		Tragschichtmaterial	Freitext
	CHARAKTERISTIKA TRAGSCHICHT	Tragschichtkörnung	[mm]
		Tragschichtstärke	[cm]
	PLANUM	k _f -Wert	[m/s]
	VERSCHMUTZUNGS-	Kategorie	Kat. 1 - 4
	/KOLMATIONSGRAD	Beschreibung Verschmutz./Kolmationsgrad	gering mäßig deutlich stark
ZUSTANDS-		Kategorie	Kat. 1 - 4
DATEN	GRAD DER VERMOOSUNG	Beschreibung Vermoosungsgrad	gering mäßig deutlich stark
	ANMERKUNGEN FLÄCHENZUSTAND	Ergänzungen Flächenzustand	Fugenbild, Verfüllung o.ä.
		Kategorie	Kat. 1 - 8
	FLÄCHENNUTZUNG	Beschreibung Flächennutzung	
		Anmerkungen	Freitext
NUTZUNGS-		Kategorie	Kat. 1 - 5
DATEN	VERKERRSBELASTUNG DURCH KFZ	Beschreibung Verkehrsbelastung	
		Kategorie	Kat. 1 - 5
	HAUFIGKEIT FLACHENREINIGUNG	Beschreibung Reinigungsrhythmus	
	STANDORTINFORMATIONEN	Standort	Beschreibung, Freitext
		Messpunkt	Beschreibung, Freitext
STANDORT-		Liegezeit	Kat. 1 - 6
DATEN	LIEGEZEIT DER FLÄCHE ZUM	Beschreibung Liegezeit	
	ZEITPUNKT DER MESSUNG	Liegezeit	[Jahre]
		Baujahr der Fläche	Freitext
		Witterung	Kat. 1 - 3
		Beschreibung Witterung	
	WITTERUNGSBEDINGUNGEN ZUM	Außentemperatur	Kat. 1 -5
	ZEITPUNKT DER MESSUNG	Außentemperatur	
VERSUCHS-		Trockendauer vor Versuchsbeginn	Kat. (-4) - 5
BEDINGUNGEN		Beschreibung Trockenperiode	
	GRAD DER VORBEFEUCHTUNG	Feuchtegrad	Kat. 1 - 6
		Beschreibung Feuchtegrad	
	MESSGERÄT	Gerätetyp	Beschreibung, Freitext
	DATUM	Messung am	Freitext
		Infiltrationsrate i ₁₀	[l/(s·ha)]
		Infiltrationsrate i _{10,m}	[l/(s·ha)]
		Infiltrationsrate i ₂₀	[l/(s·ha)]
MESS-	VERSICKERUNGSRATE	Infiltrationsrate I _{20,m}	[I/(s·ha)]
ERGEBNISSE		Infiltrationsrate i ₃₀	[I/(s·ha)]
		Infiltrationsrate I _{30,m}	[I/(s·ha)]
			[I/(s·ha)]
			[I/(s·ha)]
DATENSATZ-	DATENCATZ	ITG. INF.	Freitext
INFORMATION	DATENSALZ	Anzani Messungen am gleichen Objekt	Freitext
		Datenquelle (Messwerterhebung)	Freitext

Tabelle 11: Matrix der erfassten Flächen- und Versuchscharakteristika

3.4 Abflussmessungen an Bestandsflächen

Im Rahmen eines aufwändigen Forschungsprojektes der Fachhochschule Osnabrück wurden umfangreiche Abflussmessdaten verschiedener Pflasterbauweisen unter realen Nutzungsbedingungen gesammelt. Dabei wurden für 41 unterschiedliche Testfelder auf einem relativ stark frequentierten Parkplatz in Lingen (Ems) die Oberflächen- sowie die Drainageabflüsse aus natürlicher und künstlicher Beregnung aufgezeichnet und ausgewertet.⁹³ Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung sind in Kapitel 2.4 zusammengefasst.

Der Schwerpunkt der Datenanalyse durch die Fachhochschule Osnabrück lag auf der Dokumentation und Bewertung der aufgetretenen Oberflächenabflüsse (Abflussbeiwerte, Anlaufverzögerung u.ä.) sowie verschiedener bautechnischer Aspekte (Lagestabilität, Ebenheit, Tragfähigkeit etc.). Eine Analyse des konkreten flächenspezifischen Versickerungsvermögens sowie seiner Abhängigkeit von äußeren und baulichen Randbedingungen ist im Rahmen des Forschungsprojektes nicht erfolgt. Auf der Grundlage der durch die Fachhochschule Osnabrück dem Autor zur Verfügung gestellten Messdaten wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine solche Analyse nun vorgenommen.

Das Untersuchungsfeld besteht aus 41 baulich von einander getrennten Testflächen, die mit drei Ausnahmen jeweils eine Flächengröße von 42,5 m² aufweisen (i.d.R. je zwei Stellplätze zzgl. Fahrgasse). Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen einen Übersichtslageplan sowie eine Ansicht der Versuchsanlage aus der Vogelperspektive.



Abbildung 16: Übersichtslageplan des Versuchsfeldes in Lingen⁹⁴

Die Testfelder unterscheiden sich in ihrer baulichen Durchbildung durch den verwendeten Deckbelag, die eingesetzten Materialien für Fugen, Bettung und Tragschicht sowie durch das Oberflächengefälle und die Ausbildung des Planums. Die Anlage ist so konzipiert, dass sich eine Vielzahl der Testflächen lediglich

⁹³ Timmermann, U. (1998), (2000) und (2001)

⁹⁴ Timmermann, U. (1998)

durch eine einzige bauliche Randbedingung unterscheidet. Dadurch ist im Vergleich der Messergebnisse entsprechender Flächenpaare eine Bewertung der Einflussgröße der jeweilig einzig unterschiedlichen Randbedingung auf das Abfluss- und Versickerungsverhalten möglich.



Abbildung 17: Versuchsfeld Lingen⁹⁵

Mit Ausnahme von zwei Vergleichsflächen mit Deckbelägen aus Asphalt bzw. Sand sind alle Testflächen als Pflasterflächen ausgeführt. Die Spezifikationen der fünf unterschiedlichen Pflasterarten sind in Tabelle 12 aufgeführt. Eine Matrix mit den vollständigen baulichen Charakteristika der einzelnen Testflächen ist im Anhang enthalten. Abbildung 18 zeigt Ansichten der verschiedenen Pflasterbelagstypen sowie den Aufschluss eines Pflasterbelages.

Belag Nr.	Belagstyp	Fugenweite	Herstellerfirma Pflastersteine
B1	Bitumendecke (Asphaltfeinbeton)	- -	- -
B2	Sanddecke auf Schottertragschicht	- -	- -
В3	konventionelles Rechteckpflaster	4 mm	behaton
B4	Rechteckpflaster mit aufgeweiteten Fugen	10 mm	behaton
В5	Sickerfugenpflaster	30 mm	behaton
B6	Sickerfugenpflaster mit speziellen Drainagerinnen	4 mm	Klostermann (DrainSTON)
B7	Porenbetonpflaster	4 mm	Rekers (REKO-Drain)

Tabelle 12. Delagstypell des versuchsielde in Linge	Tabelle 12:	Belagstypen	des	Versuchsfelde	in	Lingen
---	-------------	-------------	-----	---------------	----	--------

⁹⁵ weitere Abbildungen sind im Anhang enthalten (Quelle: Impressum MSN & Windows Live)


Abbildung 18: Pflasterbelagstypen des Versuchsfeldes Lingen

Sämtliche Testflächen wurde in Regelbauweise und konform den gültigen Anforderungen an den Straßenbau erstellt. Bei jedem Pflasterbelagstyp wurde je eine Variante mit einem Oberflächengefälle von 1,0% sowie eine Variante mit 2,5% ausgeführt. Ebenso wurde jede Oberbauvariante einmal mit und einmal ohne eine Abdichtung des Planums versehen. Darüber hinaus wurden sechs verschiedene Varianten an Fugenmaterialien, zwei Varianten unterschiedlichen Bettungsmaterials sowie zwei Varianten unterschiedlichen Tragschichtmaterials verbaut.

Die messtechnische Ausrüstung des Versuchsfeldes ist äußerst beachtlich und von hoher Qualität. Die Messung der Oberflächen- und Drainageabflüsse von je vier Testflächen erfolgte jeweils separat in einem Messschacht, dem die einzelnen Abflussströme zugeleitet werden. Als Messgeräte kamen je Teilstrom ein gedükertes magnetisch-induktives Durchflussmessgerät zur Erfassung größerer Ströme sowie ein nachgeschaltetes Kleinmengenmessgerät (Prinzip: Messwippe) zum Einsatz. Die Aufzeichnung der Ströme erfolgte mit einer zeitlichen Diskretisierung von 30 Sekunden. Der Niederschlag sowie weitere Klimadaten wurden unmittelbar am Testfeld über eine gut ausgestattete Klimastation erfasst. Sämtliche Messgeräte wurden regelmäßig gewartet und rekalibriert. Die Güte der Messdaten wird insgesamt als sehr gut – im Rahmen der unvermeidbaren Messungenauigkeiten – eingestuft. Für weitere Details und Spezifikationen der eingesetzten Messtechnik wird auf die ausführlichen Beschreibungen von Timmermann⁹⁶ verwiesen.

⁹⁶ Timmermann, U. (1998), (2000) und (2001)

Neben der Aufzeichnung und Auswertung der Abflussaktivität der Untersuchungsflächen infolge natürlicher Niederschlagsereignisse wurden von der Fachhochschule Osnabrück Versuche mit künstlicher Beregnung durchgeführt. Hierzu wurden 36 der 42 Testfelder über Tropfschläuche, denen Zuflussbegrenzer, Druckminderer und Wasserzähler vorgeschaltet sind, wiederholt über einen Zeitraum von je 20 Minuten mit konstanten Intensitäten von 70, 100, 135, 200 sowie 300 l/(s·ha) berieselt. Diese Beregnungsmethode wurde vorab im Labor für Technik der Fachhochschule Osnabrück ausführlich getestet und zeichnet sich durch eine sehr homogene mengen- wie flächenbezogene Beaufschlagung der Testfelder aus, die zudem unanfällig gegen Abtrift durch Wind ist.

Die künstlichen Beregnungen bieten den Vorteil, das Abfluss- und Versickerungsverhalten unter konstanter Wasserzufuhr analysieren zu können, was die Bewertung der Ergebnisse deutlich erleichtert. Die Beregnungsversuche, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit näher analysiert werden, wurden im Sommer des Jahres 1997 durchgeführt. Je Beregnungsintensität wurden dabei je Testfeld vier Versuche an aufeinander folgenden Tagen vollzogen. Zu diesem Zeitpunkt war das Versuchsfeld rd. drei Jahre als Parkplatz des örtlichen Freizeitbades sowie des Sportstadions Lingen in Betrieb.

Im Zuge der Beregnungsversuche wurden die Versickerungsleistungen der Testflächen nicht direkt gemessen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden das Retentionsvermögen für jeden Beregnungsversuch aus den ausgewiesenen versuchsspezifischen Abflussbeiwerten ψ_m und ψ_s bzw. der maximalen Abflussrate q_{max} errechnet.

Der Rückhalt auf den Flächen setzt sich neben der Infiltration i.W. aus den Komponenten Benetzung, Muldenfüllung und Verdunstung zusammen, die jedoch nicht exakt quantifiziert sondern lediglich abgeschätzt werden können. Aus diesem Grund wurde vereinfachend das Versickerungsvermögen dem rechnerischen Retentionsvermögen gleichgesetzt. Dadurch werden die Infiltrationsleistungen prinzipiell überschätzt. Geht man jedoch davon aus, dass die Abflussspitze gegen Ende der Beregnung aufgetreten ist – also nachdem die Flächen vollständig benetzt und die Mulden gefüllt sind – spiegeln insbesondere die aus den Spitzenabflussbeiwerten errechneten Versickerungsraten das Infiltrationsvermögen nach rd. 20-minütiger Beregnung sehr gut wider (siehe Abbildung 19). Da im Rahmen der Datenanalyse ohnehin der relative Vergleich der einzelnen Testfelder bei gleichartiger hydraulischer Belastung im Vordergrund steht, wird diese Vorgehensweise vom Genauigkeitsanspruch als vollkommen hinreichend erachtet.



Abbildung 19: Abflussganglinie eines Testfeldes aus künstlicher Beregnung und daraus abgeleitete Versickerungsrate

3.5 Lysimeterversuche im Labor

Den Kern des eigenen messtechnischen Untersuchungsprogramms bilden umfangreiche Beregnungsversuche an einer Lysimeteranlage am IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur (IKT)⁹⁷. 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.

In-situ-Messungen zeichnen sich zwar dadurch aus, dass Informationen über das Versickerungsvermögen einer Testfläche unter realen Nutzungsbedingungen gewonnen werden können. Allerdings gelten die ermittelten Werte nur für die jeweils untersuchte Fläche bzw. den untersuchten Messpunkt einer Fläche. Die

⁹⁷ Bosseler et al. (2004) und IKT (2005)

Repräsentativität des jeweiligen Messpunktes ist dagegen keinesfalls sichergestellt. Zudem fällt es schwer, verschiedene Testflächen miteinander zu vergleichen, da sie sich immer durch eine Vielzahl von Randbedingungen unterscheiden.

Zur systematischen Analyse der maßgeblichen Einflussfaktoren sind daher Laboruntersuchungen besser geeignet. 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 Versickerungsleistung einer neu errichteten Pflasterung reduziert sich infolge nutzungsbedingter Einflüsse relativ rasch und mitunter in einem erheblichen Maße. Das Versickerungsvermögen im Neuzustand ist daher ohne praktische Relevanz und wurde im Rahmen der Laborversuche nur zu Vergleichszwecken untersucht. Der überwiegende Teil der Messungen wurde an Flächenbelägen durchgeführt, bei denen der Gebrauchszustand bestmöglich nachgebildet wurde, indem bestimmte Mengen an Feinpartikeln in die Fugen gespült und eine sachgerechte Verdichtung des Oberbaus sichergestellt wurde.

3.5.1 Versuchsanlage

Die Lysimeteranlage am IKT, mit der sämtliche Beregnungsversuche im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführt wurden, ist eigens für die Prüfung wasserdurchlässiger Flächenbeläge konstruiert 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). Zur Abnahme dieser Zulassungstests existieren in Deutschland nur zwei Versuchsanlagen; neben der Anlage am IKT noch eine baugleiche Anlage an der Landesgewerbeanstalt (LGA) in Würzburg.⁹⁸

Im Rahmen der o.g. DIBt-Zulassungsprüfungen muss ein Belag sowohl eine hinreichende Wasserdurchlässigkeit als auch einen ausreichend hohen Schad-

⁹⁸ Die Gleichwertigkeit der Anlagen und die Reproduzierbarkeit der Prüfungsergebnisse wurden im Vorfeld der Inbetriebnahme durch Vergleichsprüfungen an beiden Versuchsanlagen (Ge-Isenkirchen und Würzburg) sichergestellt (siehe Bosseler, B. et al. (2004).

stoffrückhalt aufweisen. In der Basiskonstruktion verfügt die Versuchsanlage daher über folgende Funktionen und Testmöglichkeiten:

- Einbau eines Belages mit einer Gesamthöhe von maximal 12 cm inkl. Bettungsschicht in einen Wechselrahmen,
- Beregnung des Belages mit einer definierten (konstanten oder variablen) Regenstärke zwischen 30 l/(s·ha) und 1000 l/(s·ha) zur Beobachtung des Abfluss- und Versickerungsverhaltens,
- Messung des Oberflächenabflusses durch Auslitern des über eine seitlich am Belags entlang geführte Ablaufrinne gesammelten Abflussvolumens,
- Beregnung des Belages mit schadstoffhaltigem Wasser und Entnahme von Sickerwasserproben zur Bestimmung des Schadstoffrückhalts,
- Messung des pH-Wertes des Sickerwassers.

Zur detaillierteren Analyse des Abfluss- und Verssickerungsverhaltens im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde die Anlage modifiziert und durch folgende Komponenten bzw. Funktionalitäten erweitert:

- Kombinationsmöglichkeit des Belages mit einer Tragschicht von 40 cm Höhe (höherer Wechselrahmen),
- Einstellen eines Gefälles des Belages zwischen 2,5 % bis 10 %,
- fortlaufende Messung des volumetrischen Wassergehaltes der Tragschicht über sechs variabel anordbare TDR-Sonden (Time-Domain-Reflectometry),

Die dreiteilige Stahlkonstruktion des Lysimeters besteht aus einem unteren Sockelbauteil mit integriertem Auffangtrichter, einem darauf liegenden Stahlrahmen mit Feinsiebboden für den Einbau des Belages sowie einer abnehmbaren Beregnungseinheit, die über dem Belag positioniert wird. Eine schematische Darstellung der Versuchsanlage zeigt Abbildung 20.

Das im Vorlagebehälter gespeicherte Beregnungswasser wird über eine Schlauchpumpe in den Zulauf der Anlage gefördert. Dabei werden die Fördermengen der Pumpe über eine Steuereinheit aus induktivem Durchflussmessgerät und einer Steuersoftware geregelt. Die gewünschten Beregnungsintensitäten und somit die Zuflussmengen zur Anlage können über die Software gewählt werden. Das Wasser wird der Beregnungseinheit, einer Acrylwanne mit 625 Kanülen, zugeführt, über die es auf den Prüfbelag tropft. Der Belag wird zuvor außerhalb der Anlage in einen abnehmbaren Wechselrahmen mit einer Grundfläche von 1,0 x 1,0 m eingebaut, der anschließend auf dem Sockelbauteil positioniert wird.



Abbildung 20: Schematische Darstellung der Lysimeteranlage

Das durch die Pflasterkonstruktion hindurch sickernde Wasser gelangt über den Feinsiebboden des Wechselrahmens in einen Auffangtrichter und wird von dort einem Kippzähler mit einem Fassungsvermögen von 1,8 Liter zugeführt, dessen Entleerungen über einen Magnetkontakt und die Steuersoftware der Anlage erfasst werden. Der Feinsiebboden des Wechselrahmens wurde so konzipiert, dass eine nahezu freie Drainage des Sickerwassers ermöglicht, ein Austrag von Tragschichtmaterial jedoch weitestgehend verhindert wird.

Der Oberflächenabfluss wird in einer umlaufenden Rinne des Wechselrahmens aufgefangen und einem zweiten Kippzähler mit einem Fassungsvermögen von 2,4 Liter zugeleitet, der auf einer Präzisionswaage angeordnet ist. Die Präzisionswaage übernimmt dabei die Messung des je Zeitintervall anfallenden Abflussvolumens, während der Kippzähler lediglich als sich automatisch entleerender Auffangbehälter dient. Die Anzahl der Kippungen wird allerdings ebenfalls registriert und kann zur Plausibilitätskontrolle der Messwerte herangezogen werden. Die Kombination aus Kippzähler und Präzisionswaage ermöglicht es einerseits, den Oberflächenabfluss in hoher zeitlicher Auflösung mengenmäßig zu bestimmten, und andererseits sowohl große Wassermengen von ca. 6 l/min als auch kleine Wassermengen von einigen Tropfen pro Minute zu erfassen. Spritzwasser, das von der Pflasterfläche zur Seite spritzt, wird durch Plexiglasscheiben in der Anlage gehalten und separat in einem Sammelbehälter aufgefangen.

Der volumetrische Wassergehalt innerhalb der Tragschicht wird punktuell über sechs TDR-Sonden gemessen, die in verschiedenen Tiefenlagen frei angeordnet werden können. Bei der Messung mittels TDR-Sonden wird über die gemessenen Laufzeiten ausgesendeter elektromagnetischer Impulse auf den Wassergehalt des um die Sondenstäbe befindlichen Materials geschlossen. Die aufgezeichneten Wassergehalte liefern dabei wertvolle Informationen über die Zustände, die innerhalb der Tragschicht auftreten (Sättigungszustand, Ausbreitung der Feuchtefront, Austrocknung etc.) und ermöglichen somit Rückschlüsse auf die physikalischen Prozesse während der Beregnungs- und Trocknungsphasen.

Sämtliche Messdaten zu den Wasserflüssen (Beregnungsintensität, Oberflächenund Sickerabfluss) sowie die volumetrischen Wassergehalten in der Tragschicht werden mit einer zeitlichen Auflösung von 10-30 Sekunden fortlaufend aufgezeichnet. Die Aufzeichnung erfolgte dabei nicht nur während des Beregnungsvorganges, sondern auch noch bis zu 72 Stunden nach Ende der Beregnung.

Zur Veranschaulichung sind im Anhang Bilder der einzelnen Bauteile der Versuchsanlage enthalten (siehe Abbildung A - 8 und Abbildung A - 9).

3.5.2 Nachbildung von Kolmationserscheinungen im Labor

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 am besten geeignete Methode zur Simulation des Feinpartikeleintrages, da es von seiner Körnungsstruktur dem Feinmaterial, das man in den Fugen von Oberflächenbefestigungen findet, sehr ähnelt.⁹⁹ Es wird daher zur Nachahmung des Gebrauchszustandes auch im Rahmen des Prüfverfahrens zur Erlangung der DIBT-Zulassung angewendet. Dabei wird das Quarzmehl breitflächig auf die Oberfläche des Pflasterbelages aufgestreut und in ein oder mehreren Beregnungsintervallen in den Fugenraum gespült.

Die Zuordnung der verwendeten Quarzmehlmengen zu verschiedenen Kolmationsgraden erfolgt durch einen Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen der vorab mittels Tropfinfiltrometer durchgeführten Messungen an den z.T. baugleichen Flächenbelägen sowie den in o.g. Datenpool aggregierten Messdaten verschiedener Untersuchungen. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden darüber hinaus auch an den im Labor untersuchten und mit Quarzmehl beaufschlagten Testflächen Infiltrationsversuche analog den Versuchen in situ durchgeführt.

⁹⁹ Davies, J.W. et al. (2002); Nehls, T. (2007); Nehls, T. et al. (2007)

Die Schwierigkeit besteht dabei darin, geeignete Quarzmehlmengen vorab abzuschätzen, da die Auswirkung der Beaufschlagung erst im Nachhinein festgestellt werden kann. So ist es nicht bei allen Versuchsserien gelungen, den gewünschten Kolmationsgrad zu erzielen (z.B. moderate, ausgeprägte, starke Kolmation). In manchen Fällen zeigten sich bereits bei vergleichsweise geringen Quarzmehlmengen sehr ausgeprägte Kolmationserscheinungen; bei anderen Belägen führten auch sehr große Mengen an aufgetragenem Quarzmehl zu keiner nennenswerten Verringerung des Versickerungsvermögens. Dennoch hat sich diese Vorgehensweise zur Nachbildung von Kolmationseffekten 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.

3.5.3 Untersuchte Flächentypen und Flächeneigenschaften

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 13 zusammengestellt.

In Versuchsserie 1 wurde ein Pflasterbelag aus einem herkömmlichen gefügedichten Betonstein mit 10 mm breiter splittverfüllter Fuge getestet. Der Belag war im Fischgrätverband verlegt und lag auf einer 40 cm mächtigen Tragschicht aus Schotter (Brechkorngemisch 0/45 mm) sowie einer Bettungsschicht aus Splitt (2/5 mm). Er ist baugleich mit einer der im Rahmen der Feldmessungen in Lingen untersuchten Flächen. Das Gefälle betrug 2,5%.

Der Belag wurde in der Lysimeteranlage im Neuzustand sowie für verschiedene Kolmationszustände, die durch Aufbringen von Quarzmehlmengen in Höhe von 500 g/m², 1000 g/m² und 2000 g/m² nachgebildet wurden, untersucht. Beaufschlagt wurde die Fläche dabei jeweils mit relativ hohen Beregnungsintensitäten von 200 l/(s·ha) bis 800 l/(s·ha) über Zeiträume von 1-3 Stunden. Die Versuchsserie diente in erster Linie dem Test der Anlage und der prinzipiellen Untersuchungsmethodik. Die Messeinrichtungen funktionierten dabei – durchaus erwartungsgemäß – noch nicht ganz einwandfrei. Aus diesem Grund wurde dieser Pflasteraufbau in der Versuchsserie 4 nochmals betrachtet und dabei für eine Vielzahl unterschiedlicher Quarzmehlmengen jeweils bei Beregnungsintensitäten von 100-300 l/(s·ha) untersucht.

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 I/(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 I/(s·ha)	Doppelver- bundstein
4 (16)	Sickerfugenpflaster splittverfüllte Fugen	10 mm (14%)		0 - 8600 g/m² (8)	100-300 I/(s·ha)	Rechteckstein (behaton)
5 (31)	fugenarmes Beton- pflaster	3-4 mm (4,5%)	2,5%	0 - 400 g/m² (3)	25-1000 I/(s·ha)	Doppelver- bundstein
	Schottertragschicht (ohne Deckbelag)	_	_	_	100-500 I/(s·ha)	
	Sickerfugenpflaster splittverfüllte Fugen	10 mm (14%)	2,5%	0 - 2000 g/m² (3)	200-1000 I/(s·ha)	Rechteckstein (behaton)
	Betonpflaster leicht aufgew. Fugen	7 mm (10%)	2,5%	0 - 1000 g/m² (3)	200-1000 I/(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 I/(s·ha)	Doppelver- bundstein
	fugenarmes Beton- pflaster	3-4 mm (4,5%)	2,5%	0 - 400 g/m² (2)	25-1000 I/(s·ha)	Rechteckstein
6 (5)	Porenbetonpflaster	3-4 mm (4,5%)	7,5%	nur Neuzustand	200-1000 I/(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 I/(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/m ²	100-500 l/(s·ha	Platten 30x30 cm

Tabelle 13:	Übersicht der	Versuchsserien	am Lysimeter
-------------	---------------	-----------------------	--------------

Serie: Werte in Klammern geben die Anzahl der Versuche innerhalb der Serie an. Dabei wurden je Versuch z.T. mehrere Beregnungsintensitäten 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.

Ein ähnlicher Pflasterstein, jedoch fugenarm mit einer Fugenweite von lediglich 3-4 mm verlegt, wurde in Versuchsserie 2 untersucht. Der Belag ist ebenfalls baugleich mit einer Testfläche der Feldmessungen. Die Pflastersteine wurden ebenfalls im Fischgrätmuster verlegt und die Fugen mit Sand verfüllt. Betrachtet wurde nur ein Oberflächengefälle von 2,5%, jedoch drei unterschiedliche Kolmationsgrade (Neuzustand, 500 g Quarzmehl und 750 g Quarzmehl) überwiegend bei Beregnungsintensitäten von 100 l/(s·ha), 200 l/(s·ha), 300 l/(s·ha) und 500 l/(s·ha). Dabei wurden einige Versuche mehrfach und z.T. vollständig samt Einbau wiederholt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen.

Sehr intensiv wurde das Abfluss- und Versickerungsverhalten eines fugenarmen Pflasterbelages aus Doppelverbundpflaster untersucht, auch wenn dieser Flächentyp nicht durch eigene In-situ-Messungen abgedeckt wird. Doppelverbundpflaster stellt jedoch eine klassische und überaus weit verbreitete Pflasterbauweise dar, die auch heute noch überaus häufig verbaut wird. Aus diesem Grund wurden Doppelverbundpflasterbeläge sowohl in der Versuchsserie 3 als auch in der Versuchsserie 5 eingehend analysiert. Generell ist jedoch davon auszugehen, dass das Format der Pflastersteine von untergeordneter Bedeutung ist und dass sich das Versickerungsverhalten des Doppelverbundpflasters sowie des Rechteckpflasters bei ähnlichen Fugenanteilen und identischen Fugenmaterialien nicht wesentlich unterscheidet.

Im Rahmen von Versuchsserie 3 wurden Beregnungsversuche bei drei unterschiedlichen Gefällestufen durchgeführt (2,5%, 5,0% und 7,5%), um den Einfluss der Oberflächenneigung auf das Abfluss- und Versickerungsverhalten quantifizieren zu können. Betrachtet wurden dabei vier unterschiedliche Kolmationsgrade. Neben dem Neuzustand wurden Beaufschlagungen von 200 g, 400 g und 500 g Quarzmehl pro Quadratmeter untersucht. Dabei wurden geringere Quarzmehlmengen aufgebracht als in Versuchsserie 2, da bereits dort durch den geringen Fugenanteil von ebenfalls ca. 4,5% Mengen von 500 g/m² zu starken Kolmationserscheinungen geführt haben. Für den Belag aus Doppelverbundpflaster konnten die aufgetragenen Quarzmehlmengen später einem "moderaten", einem "ausgeprägten" sowie einem "hohen" Kolmationsgrad zugeordnet werden. Der Aufbau der Pflasterfläche gleicht ansonsten dem Aufbau des Pflasterbelages in Versuchsserie 2 (s.o.).

Neben konstanten Beregnungsintensitäten von 100 l/(s·ha), 150 l/(s·ha), 200 l/(s·ha) sowie 300 l/(s·ha) umfasste die Versuchsserie auch einen Beregnungsversuch mit dem Intensitätsverlauf eines Euler-Modellregens (Typ II) mit einer Häufigkeit von n = 0,2 a⁻¹, um den Einfluss einer intensitätsvariablen Niederschlagsbelastung zu untersuchen.

Die Versuche mit Intensitäten von 150 l/(s·ha) zielten darauf ab, den Einfluss unterschiedlich langer Trockenperioden auf das Versickerungsvermögen und den Sättigungszustand der Tragschicht zu ermitteln. Hierzu wurden je Versuch drei bis vier 30-minütige Beregnungsintervalle gefahren. Zwischen den Beregnungen lagen Trockenperioden von 2 h, 4 h, 15 h und 24-96 h.

In Versuchsserie 5 wurden verschiedene Belagstypen untersucht, die jeweils ohne Tragschicht in den Wechselrahmen eingebaut wurden. Diese Maßnahme diente dazu herauszufinden, welchen Einfluss die vergleichsweise stark durchlässige Schottertragschicht auf das Versickerungsverhalten eines gering bis mäßig durchlässigen Deckbelages hat. Diese Auswirkung kann durch den Vergleich mit den Ergebnissen bspw. aus der Versuchsreihe 3 (Pflasterbelag auf 40 cm mächtiger Tragschicht) bewertet werden. Dabei wurde ein Doppelverbundpflaster einmal auf einer Bettungsschicht aus Splitt in einen flachen Wechselrahmen eingebaut, also ganz ohne Tragschicht und mit freier Drainage der Pflasterbettung. In einem zweiten Versuchszyklus wurde der Belag auf einer 40 cm starken Tragschicht aus besonders durchlässigem Splitt (2/5 mm) in den hohen Wechselrahmen eingebracht. In beiden Fällen betrug das Oberflächengefälle 2,5%.

Darüber hinaus wurden innerhalb der Versuchsserie 5 zwei klassische Sickerfugenbeläge mit aufgeweiteten splittverfüllten Fugen, einmal mit einer Fugenweiten von 10 mm¹⁰⁰, einmal mit einer Fugenweite von 7 mm (Fugenanteile ca. 14% und 10%) sowie ein fugenarmes Betonpflaster aus Rechtecksteinen (ohne Tragschicht sowie auf Splitt-Bettung)¹⁰¹ und ein poröser Pflasterbelag aus haufwerksporigen Betonsteinen untersucht. Je nach Fugenanteil wurden die verschiedenen Belagstypen mit unterschiedlichen Quarzmehlmengen beaufschlagt, wobei jeweils zwei bis vier unterschiedliche Kolmationsgrade betrachtet wurden. Die durchweg konstanten Beregnungsintensitäten bewegten sich zwischen 25 l/(s·ha) und 1000 l/(s·ha). Die Beregnungsdauern betrugen i.d.R. ein bis zwei Stunden.

In Versuchsserie 5 wurde zudem eine Schotterschicht in singulärer Aufstellung ohne einen Deckbelag aus Pflastersteinen betrachtet. Diese Versuche dienten zum einen dazu, das reine Versickerungsvermögen der Schotterschicht zu ermitteln. Dabei wurde insbesondere die vertikale Ausbreitung der Feuchtefront mit Hilfe der TDR-Sonden beobachtet. Zum zweiten wurde analysiert, inwiefern sich ein gering durchlässiges Planum auf den Wassergehalt in der Tragschicht auswirkt. Hierzu wurde in einem zweiten Versuchszyklus eine 25 cm mächtige Schottertragschicht über einer 15 cm starken hydraulischen Sperrschicht aus Sand und Quarzmehl (k_f-Wert $\approx 2 \cdot 10^{-7}$ m/s) angeordnet und mit den gleichen Beregnungsintensitäten beaufschlagt wie zuvor. Die Versuche an der Schotterschicht können dabei auch als Indikator zur Einschätzung des Versickerungsver-

¹⁰⁰ analog dem Pflasterbelag in den Versuchsserien 1 und 4

¹⁰¹ analog dem Pflasterbelag in der Versuchsserie 2

mögens von festen Kies- oder Schotterschichten als eigenständiges Befestigungssystem dienen.

In der sechsten Versuchsserie wurde wiederum ein poröser Pflasterbelag aus fugenarm verlegten Porenbetonsteinen untersucht. Hierbei stand die Frage im Vordergrund, ob dieser insgesamt äußerst versickerungsstarke Belagstyp selbst bei vergleichsweise hohem Gefälle von 7,5% und hohen Beregnungsintensitäten von 200-1000 l/(s·ha) keinen nennenswerten Oberflächenabfluss liefert.

Die abschließende Versuchsserie 7 befasste sich mit versickerungsschwachen Plattenbelägen. Im Rahmen der Versuchsserie wurden drei unterschiedliche Plattenbeläge mit schmalen Fugenweiten von 3-4 mm getestet, die sich zwar lediglich durch die Größe der Platten unterscheiden, jedoch unterschiedliche Fugenanteile von 0,6%, 1,2% und 1,8% aufweisen. Dabei war auch ein Versuchszyklus integriert, bei dem der Plattenbelag samt Tragschicht wiederum auf einem geringer durchlässigen Planum angeordnet ist. Die Versuche wurden für den Neuzustand und bei Quarzmehlmengen von 500 g/m² jeweils bei einem Oberflächengefälle von 2,5% durchgeführt.

Die detaillierten Matrizes der einzelnen Versuchsserien sind im Anhang enthalten.

3.6 Numerische Simulation der Strömungsvorgänge im Pflasteraufbau

Durch die Lysimeterversuche im Labor wurde eine umfangreiche Datenbasis zur Analyse des Versickerungsverhaltens von Pflasterflächen generiert. Dabei wurde für jeden Versuch das Abflussgeschehen an der Oberfläche, die Änderung der Wassergehalte in der Tragschicht sowie der an der Unterseite des Pflasteraufbaus austretende Sickerabfluss erfasst. Die Messwerte stellen das Resultat der auf und innerhalb der Pflasterkonstruktion ablaufenden physikalischen Prozesse dar und charakterisieren somit das flächenspezifische Versickerungsphänomen. Sie vermögen allerdings nur in begrenztem Umfang Aufschluss über die hydraulischen Zustände innerhalb des Pflasteraufbaus zu geben.

Mit der ergänzenden Anwendung eines numerischen Strömungsmodells auf verschiedene Pflasterbauweisen wurden mehrere Ziele verfolgt. Zum einen soll die Nachrechnung durchgeführter Beregnungsversuche zur Plausibilitätskontrolle der aufgenommenen Messwerte beitragen. Darüber hinaus liefert das Berechnungsmodell bodenhydraulische Zustandswerte für den gesamten Querschnitt der Pflasterkonstruktion und ermöglicht damit Einblicke in die in der Konstruktion (zumindest rechnerisch) vorherrschenden hydraulischen Verhältnisse während und nach einer Beregnung. Damit trägt die Modellanwendung zum Prozessverständnis bei und steigert den Kenntnisgewinn aus der messtechnischen Bepro-

bung in ganz erheblichem Maße. Schließlich eröffnet die Nachbildung der Laborversuche im Modell die Option, ergänzende Szenarien mit systematisch variierten baulichen oder klimatischen Randbedingungen zu betrachten, die im Labor nicht untersucht werden konnten. Auf diese Weise können die verfügbare Datenbasis nochmals erheblich erweitert und die Erkenntnisse weiter vertieft werden.

Zur Anwendung kam dabei das vom U.S. Salinity Laboratory entwickelte numerische Simulationsprogramm HYDRUS-2D, ein detailliertes Finite-Elemente-Modell zur Berechnung von Wasser-, Wärme- und Stofftransportvorgängen in porösen Medien¹⁰². Die Modellanwendung beschränkte sich dabei auf die hydraulische Strömungsberechnung.

Die Berechnung der Wassertransportvorgänge erfolgt in HYDRUS-2D durch Lösung der nachstehenden Strömungsgleichung von Richards¹⁰³. Die Gleichung beschreibt den zweidimensionalen Wassertransport in einem porösen ungleichmäßig gesättigten Feststoffmedium auf Grundlage des Strömungsgesetzes von Darcy-Buckingham unter Vernachlässigung des Strömungseinflusses durch die Luft-Phase.

$$\frac{\delta \Theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x_i} \Biggl[K \cdot \Biggl(K^{\text{A}}_{ij} \, \frac{\delta h}{\delta x_i} + K^{\text{A}}_{iz} \Biggr) \Biggr] - S$$

mit Θ : volumetrischer Wassergehalt

- t: Zeit
- x_i: horizontale und vertikale Raumkoordinaten (i.d.R. $x_1 = x, x_2 = z$)
- K: ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit K(h,x,z).
- h: Druckhöhe
- K^{A}_{ij} : Komponenten des dimensionslosen Anisotropie-Tensors K^{A}
- S: Senkterm (z.B. Wasseraufnahme durch Vegetation)

Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit ergibt sich dabei nach folgender Grundgleichung:

$$K(h,x,z) = K_s(x,z) \cdot K_r(h,x,z)$$

mit K_s: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit

K_r: relative hydraulische Leitfähigkeit.

¹⁰² © PC-Progess s.r.o. & U. S. Salinity Laboratory, Programmversion 2.05

¹⁰³ Simunek, J. et al. (1999): HYDRUS-2D Manual

Der volumetrische Wassergehalt $\Theta(h)$ sowie die hydraulische Leitfähigkeit K(h) sind im ungesättigten Zustand hochgrad nichtlineare Funktionen der Druckhöhe h. Die Zusammenhänge zwischen Druckhöhe, Wassergehalt und hydraulischer Leitfähigkeit können in HYDRUS-2D über drei alternative Berechnungsansätze berücksichtigt werden. Hierzu stehen optional der Berechnungsansatz von Brooks und Corey (1964), der Ansatz von van Genuchten (1980) sowie ein modifizierter Van-Genuchten-Ansatz nach Vogel und Císlerová (1988) zur Verfügung. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kam ausschließlich der Berechnungsansatz von van Genuchten zur Anwendung. Er liefert eine realitätsnähere Beschreibung als der Ansatz von Brooks und Corey, arbeitet aber mit weniger und daher leichter bestimmbaren Parametern als der Ansatz nach Vogel und Císlerová.

Der Ansatz von van Genuchten kombiniert den Ansatz von Brooks und Corey mit einem Ansatz von Mualem (1976) zur statistischen Porengrößenverteilung und beschreibt die bodenhydraulischen Wechselwirkungen zwischen Druckhöhe, Wassergehalt und hydraulischer Leitfähigkeit über fünf voneinander unabhängige Bodenparameter. Der Wassergehalt $\Theta(h)$ und die hydraulische Leitfähigkeit K(h) ergeben sich dabei nach folgenden Gleichungen:

$$\Theta(h) = \begin{cases} \Theta_{r} + \frac{\Theta_{s} - \Theta_{r}}{\left[1 + \left|\alpha \cdot h\right|^{n}\right]^{m}} & \text{für } h < 0 \text{ und mit } m = 1 - 1/n \text{ (für } n > 1) \\ \Theta_{s} & \text{für } h \ge 0 \end{cases}$$

 $K(h) = K_{s} \cdot S_{e}^{c} \cdot \left[1 - \left(1 - S_{e}^{1/m}\right)^{m}\right]^{2} \quad \text{mit} \quad S_{e} = \frac{\Theta - \Theta_{r}}{\Theta_{s} - \Theta_{r}}$

mit Θ : volumetrischer Wassergehalt

- h: Druckhöhe
- Θ_r : Restwassergehalt
- Θ_s : Wassergehalt bei Sättigung
- α: Lufteintrittkoeffizient (empirischer Formbeiwert)
- n: Porengrößenverteilungsindex (empirischer Formbeiwert)
- m: empirischer Formbeiwert
- K: hydraulische Leitfähigkeit
- K_s: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit
- S_e: effektiver Wassergehalt
- c: Porenkonnektivitätsindex (empirischer Formbeiwert).

Für den Porenkonnektivitätsindex c in der Bestimmungsgleichung der hydraulischen Leitfähigkeit kann nach Mualem unabhängig vom Bodentyp ein Zahlenwert von c = 0,5 angesetzt werden. Als Parameter zur Beschreibung der jeweiligen Bodeneigenschaften verbleiben daher der Restwassergehalt Θ_r , der Sättigungswassergehalt Θ_s , die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_s sowie die empirischen Formbeiwerte α und n.

Die o.g. bodenhydraulischen Berechnungsgleichungen werden in HYDRUS-2D unter Verwendung eines Rasters finiter Elemente nach der Galerkin-Methode¹⁰⁴ numerisch gelöst. Der zu überrechnende Bodenkörper wird im Modell durch ein Netzwerk an Dreieckselementen repräsentiert, wobei jedem Element die entsprechenden bodenhydraulischen Parameterwerte zugeordnet sind. Die äußeren Ränder des Netzwerkes sind den jeweils vorliegenden Randbedingungen entsprechend gesondert zu definieren (z.B. Grenzfläche zur Atmosphäre, Zufluss, Druckhöhe, freie Drainage usw.).

Aufgrund der ausgesprochen detaillierten mathematischen Beschreibung der bodenhydraulischen Prozesse ist das Simulationsprogramm HYDRUS-2D in der Lage, die Wassertransportvorgänge auch in einer inhomogen aufgebauten porösen Feststoffmatrix wie dem Oberbau einer Pflasterkonstruktion einschließlich der Deckschicht aus Pflastersteinen und Fugenfüllung detailliert und realitätsnah nachzubilden. Es stellt daher ein nützliches Werkzeug dar, um im Rahmen der vorliegenden Arbeit den Infiltrationsvorgang auf einer Pflasterfläche sachgerecht zu berechnen und näher zu analysieren.

Zur Ergänzung der phänomenologischen Analyse des Versickerungsverhaltens wurde das Modell auf drei verschiedene Pflasterbauweisen angewendet: einen konventionellen fugenarmen Plattenbelag, einen konventionellen fugenarmen Pflasterbelag sowie einen Belag aus Sickerfugenpflaster mit entsprechend aufgeweiteten Fugen. Dabei wurden die Pflasterkonstruktionen jeweils analog zum Aufbau im Verssuchstand im Modell nachgebildet. Darüber hinaus wurde der Fugenraum eines konventionellen Pflasterbelages mit höherer räumlicher Diskretisierung im Modell abgebildet und überrechnet, um verschiedene Detailaspekte des Infiltrationsvorganges eingehender zu betrachten.

Die Berechnungsparameter im Ansatz von van Genuchten wurden für die verwendeten mineralischen Baustoffe (Sand, Splitt, Schotter) auf der Grundlage von Literaturwerten¹⁰⁵ sowie bekannter Materialeigenschaften abgeschätzt. Anschließend wurden die Datenmodelle anhand der Messergebnisse aus den Lysimeterversuchen kalibriert.

Die Kalibrierung erfolgte schrittweise. Zunächst wurden der Deckbelag sowie die Tragschicht separat betrachtet und die Berechnungsparameter anhand der

¹⁰⁴ Simunek, J. et al. (1999)

¹⁰⁵ Fach, S. (2006); Nehls, T. (2007)

Messergebnisse aus der Beprobung der Einzelschichten in singulärer Anordnung angepasst. Erst in einem zweiten Schritt wurde schließlich der Gesamtaufbau aus Pflasterdecke, Pflasterbettung und Tragschicht an den entsprechenden Versuchsergebnissen kalibriert. Als Referenzwerte dienten die messtechnisch erfassten Verläufe der Infiltrationsrate an der Oberfläche, der Exfiltrationsrate an der Unterseite¹⁰⁶ sowie der Wassergehalte in verschiedenen Horizonten der Tragschicht. Hystereseeffekte sowie die Wasseraufnahme durch Pflanzen wurden bei der Modellierung nicht angesetzt.

Bei der Kalibrierung besteht grundsätzlich die Problematik, dass durchaus eine Vielzahl von Parameterkombinationen und Modelleinstellungen zu einer zufriedenstellenden Übereinstimmung zwischen den Berechnungsergebnissen und den Referenzwerten aus den Messungen führen können. Inwiefern die letztlich verwendeten Parametereinstellungen tatsächlich zutreffen, kann daher ohne aufwändige Materialanalysen nicht beurteilt werden. Dennoch wird unterstellt, dass die kalibrierten Rechenmodelle die relevanten Durchströmungsvorgänge der betrachteten Pflasterbauweisen¹⁰⁷ mit angemessener Genauigkeit widerspiegeln. Insbesondere aus dem relativen Vergleich der Berechnungsergebnisse verschiedener baulicher Szenarien können aus den Modellanwendungen fundierte und verlässliche Aussagen über den prinzipiellen Einfluss einzelner Randbedingungen abgeleitet werden.

Über die rechnerische Nachbildung einzelner Lysimeterversuche hinaus wurde das Modell angewandt, um den Einfluss verschiedener baulicher und klimatischer Randbedingungen auf das Infiltrationsvermögen zu analysieren. Hierzu wurden auf der Basis der kalibrierten Modelle der drei o.g. Belagstypen einzelne Randbedingungen schrittweise variiert. Tabelle 14 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Vergleichssimulationen.

Bei allen drei Belagstypen wurde untersucht, inwieweit die Regenintensität einen Einfluss auf die Infiltrationsrate des Deckbelages hat. Hierzu wurden die kalibrierten Basismodelle für die verschiednen Belagstypen im Gebrauchszustand für konstante Regenintensitäten zwischen 25 l/(s·ha) und 1000 l/(s·ha) überrechnet¹⁰⁸. Für den konventionellen Pflasterbelag wurden überdies ein zweistündiger Euler-Modellregen und eine Intervallberegnung mit unterschiedlich langen Trockenperioden betrachtet.

 ¹⁰⁶ eindringende und austretende Volumenströme je Zeit sowie als kumulative Volumenströme
¹⁰⁷ Pflasterbauweise im Sinne des jeweiligen Pflasterstyps; dies muss nicht zwingend der konkret nachgebildete Versuchsaufbau sein.

¹⁰⁸ z.T. bei ebenfalls variierenden Regendauern

Charakteristika & Simulationsszenarien	fugenarmer Plattenbelag	fugenarmes Betonpflaster	Sickerfugen- pflaster	
Fugenweite	4 mm	4 mm	10 mm	
Fugenanteil	1,8%	4,5%	14,0%	
Referenzserie Lysimeter	Serie 7 Serien 2, 3 & 5		Serien 4 & 5	
Variation Beregnung	r = 25-400 l/(s⋅ha)	r = 25-1000 l/(s·ha)	r = 50-150 l/(s·ha)	
Regendauer	D = 30 min	D = 30 min	D = 60-360 min	
Variation Bettungsmaterial	B01 - B05	B01 - B05	-1-	
Regenbelastung	r ₁₂₀ = 100 l/(s⋅ha)	r ₃₀₋₁₂₀ = 100-300 l/(s⋅ha)	I	
Variation Tragschichtmaterial	TS01 - TS10	TS01 - TS10	-1-	
Regenbelastung	r ₁₂₀ = 100 l/(s⋅ha)	r ₃₀₋₁₂₀ = 100-300 l/(s⋅ha)	-1-	
Variation Planum (bei h_{TS} = 30 cm)	P01 - P10	P01 - P10	P01 - P10	
Regenbelastung	r ₁₂₀ = 100 l/(s⋅ha)	r ₆₀₋₂₄₀ = 50-100 l/(s⋅ha)	r ₃₀₋₁₂₀ = 25-400 l/(s⋅ha)	
Variation Planum (bei $h_{TS} = 15$ cm)	-1-	P01 - P10	P01 - P10	
Regenbelastung	-1-	r ₆₀₋₂₄₀ = 50-100 l/(s⋅ha)	r ₃₀₋₁₂₀ = 25-400 l/(s⋅ha)	

Tabelle 14:	Übersicht (der Vergleic	hssimulationen	mittels	HYDRUS-2	2D
-------------	-------------	--------------	----------------	---------	----------	----

Ferner wurde untersucht, wie sich variierende bodenhydraulische Eigenschaften der mineralischen Baumaterialien für Bettung und Tragschicht auf das Infiltrationsvermögen auswirken. Hierzu wurden für die beiden fugenarmen Belagsarten Vergleichssimulationen mit fünf unterschiedlichen Bettungsmaterialien (B01-B10) und zehn unterschiedlichen Tragschichtmaterialien (TS01-TS10) mit kontinuierlich abnehmenden hydraulischen Leitfähigkeiten durchgeführt. Des Weiteren wurden alle drei Belagstypen bei unterschiedlich durchlässigem Planum betrachtet. Hierzu wurden zehn unterschiedliche Plana (P01-P10) mit fortschreitend abnehmenden hydraulischen Leitfähigkeiten bei zwei verschiedenen Tragschichtmächtigkeiten von 15 cm sowie 30 cm simuliert.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Ergebnisse der Infiltrationsversuche an Bestandsflächen

4.1.1 Messungen mittels Tropfinfiltromter

Nachfolgend werden die im Rahmen der Infiltrometermessungen an den Standorten in Lingen, Gelsenkirchen, Kevelaer und Straelen in situ mit Hilfe eines Tropfinfiltrometers gewonnen Messdaten zum Versickerungsvermögen dargestellt und diskutiert.¹⁰⁹

Auf dem bereits von der Fachhochschule Osnabrück intensiv untersuchten Parkplatz in Lingen¹¹⁰, der 1994 im Rahmen des damaligen Projektes als Versuchsanlage errichtet worden ist, wurde das Versickerungsvermögen von vier unterschiedlichen Pflasterbauweisen beprobt. Das Oberflächengefälle der Testflächen beträgt jeweils 2,5%.



Abbildung 21: Untersuchungsflächen am Standort Lingen

Vier Infiltrometermessungen wurden auf einem Stellplatz des Parkplatzes aus fugenarm verlegten Rechtecksteinen¹¹¹ durchgeführt; davon zwei Messungen jeweils im Zentrum des Stellplatzes und zwei Messungen in Bereichen, in denen verstärkte mechanische Belastungen durch ein- und ausparkende Fahrzeuge

¹⁰⁹ Die Infiltrometermessungen wurden von der Fa. HydroCon GmbH (Münster) durchgeführt.

¹¹⁰ siehe auch Kapitel 2.4 und Kapitel 3.4

¹¹¹ Hersteller: behaton; Fugenbreite: 3-4 mm; Fugenfüllung: Sand 0/1 mm

auftreten (Radspur des Stellplatzes¹¹²). Die in Abbildung 22 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 kapazitive Abstandssensor des Tropfinfiltrometers jedoch auch nicht ganz einwandfrei, sodass die Fläche zeitweilig mit zu wenig Wasser beregnet wurde.



Abbildung 22: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an fugenarmem Standardpflaster aus gefügedichten Betonsteinen¹¹³

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

¹¹² Lage: rd. 50 cm von der seitlichen Begrenzung nach innen

¹¹³ Die Gangliniendarstellungen zeigen zur besseren Veranschaulichung jeweils die fortlaufenden Mittelwerte der gemessenen Infiltrationsraten. Dadurch wird der Verlauf geglättet, verfälscht jedoch die Werte geringfügig. Aufgrund der z.T. deutlich höheren Anfangsversickerungsraten zeigen die Infiltrationskurven dadurch insbesondere im ersten Drittel etwas zu hohe Werte. Eine Gegenüberstellung von Ist-Werten und durch Mittelwertbildung geglättet Infiltrationsganglinien ist im Anhang exemplarisch aufgeführt (Abbildung A - 17).

Belages. Es muss davon ausgegangen werden, dass diese hohen Werte nicht unbedingt repräsentativ für diesen Belagstyp sind, sondern hier ein wenig kolmationsbeeinflusster Standort vorliegt.

Die Messungen an einer Stellplatzfläche aus ebenfalls gefügedichten Betonpflastersteinen, jedoch mit splittverfüllten Fugen von 10 mm Breite, ergaben die in Abbildung 23 dargestellten Infiltrationsverläufe¹¹⁴. Beprobt wurden hier zwei Stellen, wiederum in Stellplatzmitte und im Bereich der Radspur. Auch hier zeigt sich ein signifikanter Unterschied in den Versickerungsleistungen dieser in unterschiedlichem Maße durch ein- und ausparkender Fahrzeuge beanspruchten Bereiche. Im Bereich der Radspur liegen die Versickerungsraten um das fünffache unter den Infiltrationsraten der geringer belasteten Stellplatzmitte, bei der die Versickerungsrate im Laufe der Versuchsdauer von rd. einer Stunde auch in weitaus geringerem Maße abnahm; in den ersten fünf Minuten steigt sie sogar an. Trotzdem überraschen auch hier die insgesamt vergleichsweise hohen Versickerungsraten von bis zu 600 l/(s·ha).



Abbildung 23: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an Sickerfugenpflaster aus gefügedichten Betonsteinen mit 10 mm breiten, splittverfüllten Fugen

Auf zwei weiteren Stellplätzen auf dem o.g. Parkplatz in Lingen wurden je zwei Infiltrometerversuche an einem Pflasterbelag aus porösen, fugenarm verlegten Betonsteinen sowie an einem ebenfalls fugenarm verlegten Sickerfugenbelag durchgeführt. Bei dem Porenpflasterbelag¹¹⁵ erfolgt die Versickerung sowohl über

¹¹⁴ Hersteller: behaton; Rechteckstein mit Abstandhaltern; Fugenmaterial: Splitt 2/5 mm

¹¹⁵ Hersteller: Rekers; Pflasterstein: REKO-Drain

die mit gewaschenem Sand¹¹⁶ gefüllten Fugen von 3-4 mm Breite als auch durch die offenporige Steinstruktur. Im Gegensatz dazu besteht das Sickerfugenpflaster¹¹⁷ aus gefügedichten Betonsteinen, die eine Versickerung ausschließlich über die mit einem grobkörnigen Sand-Splitt-Gemisch¹¹⁸ gefüllten Fugen zulassen. Der Sickerfugenbelag weist zwar mit Fugenbreiten von lediglich 4 mm nur einen vergleichsweise geringen Fugenanteil von 6% auf, besitzt jedoch an den Seitenwänden der Betonsteine speziell geformte horizontal und vertikal verlaufende Rillen zur besseren Ableitung des Wassers in die Unterkonstruktion. Die Ergebnisse der Infiltrometermessungen an diesen beiden Pflasterbelägen sind in Abbildung 24 grafisch dargestellt.



Abbildung 24: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an fugenarmem Porenbetonpflaster sowie an Sickerfugenpflaster mit speziell ausgebildeten Ableitungsrinnen

An beiden Belägen wurden wiederum Bereiche mit unterschiedlich hoher Beanspruchung durch Fahrzeuge untersucht (Stellplatzmitte und bevorzugte Radspur) und auch hier sind die Differenzen in den Versickerungsganglinien signifikant. Besonders augenfällig ist dabei die hohe Infiltrationsrate des minder belasteten Belages aus Porenbetonpflaster, die während der ersten 15 Minuten des Versuches kontinuierlich ansteigt und dann auf einem Niveau > 1.800 l/(s·ha) verbleibt (lediglich leicht abfallend). Für den Bereich der Radspur wurden zu Versuchsbeginn ebenfalls hohe Werte registriert; die Versickerungsrate reduzierte

¹¹⁶ Körnung 0/5 mm

¹¹⁷ Hersteller: Klostermann; Pflasterstein: drainSTON

¹¹⁸ firmeneigene Mischung mit Körnung 0/5 mm

sich jedoch sukzessive bis zu einem Endwert von rd. 150 $I/(s \cdot ha)$ und war damit um mehr als das Zehnfache geringer.

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 I/(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 in Analogie zu Borgwardt als (versuchsspezifische) Anfangsinfiltrationsrate definiert. Als Endinfiltrationsrate wird der Messwert nach einer Versuchsdauer von rd. 60 Minuten bezeichnet. In Abbildung 25 sind die Anfangsund Endinfiltrationsraten der vier am Standort Lingen untersuchten Pflasterbauweisen einander gegenüber gestellt. Die Grafik unterstreicht noch einmal, dass selbst mäßig durchlässige Pflasterarten auch nach mehr als zehnjähriger Liegezeit ein erstaunlich hohes Versickerungsvermögen aufweisen können.



Abbildung 25: 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. Dabei mag nicht nur die mechanische Einwirkung eine Rolle spielen, sondern möglicherweise auch beim Bremsvorgang von den Bremsscheiben abgestoßene Feinstäube. Dennoch scheint es plausibel, dass in erster Linie die Achslasten von Fahrzeugen eine sukzessive Nachverdichtung der Pflasterbettung bewirken, wodurch sich das Porenvolumen des Bettungsmaterials reduziert.

Die Nachverdichtung mit der einhergehenden Reduzierung des Porenvolumens hat zur Folge, dass die hydraulische Leitfähigkeit des Bettungsmaterials abnimmt. In den ersten Minuten einer Beregnung oder eines Versickerungsversuches weisen daher die höher und die minder belasteten Bereiche einer Pflasterfläche Versickerungsraten gleicher Größenordnung auf. Sobald jedoch die Interzeption abgeschlossen und die Grobporen in den Fugen (ggf. auch der Bettung) zumindest teilgefüllt sind, macht sich die reduzierte hydraulische Leitfähigkeit der Bettungsschicht bemerkbar. Insbesondere der geringere Anteil weiter Grobporen in der übermäßig nachverdichteten Pflasterbettung kann dazu führen, dass die Infiltrationsrate rasch sinkt. Inwiefern durch erhöhte und/oder gehäufte mechanische Belastungen dabei auch eine Nachverdichtung des Fugenmaterials erfolgt, kann anhand der Messdaten nicht beurteilt werden.

Allerdings hat die Nachverdichtung noch einen weiteren Effekt, der zu einer verstärkten Abnahme des Versickerungsvermögens führen kann. Infolge der fahrzeugbedingten Verdichtungsarbeit können sich Spurrillen bilden, die bevorzugte Fließwege des Oberflächenabflusses darstellen und über die verstärkt Feinpartikel in die Fugen eingetragen werden. Dies führt zu einer zunehmenden Pfützenbildung sowie insbesondere zu einer gesteigerten Verschlämmung oder Kolmation dieser Bereiche. Dieses Phänomen ist auch optisch wahrnehmbar, findet man doch gerade in diesen Bereichen verstärkt dunkelfarbiges Feinmaterial auf der Oberfläche. Teilweise verfärben sich auch die Pflastersteine dunkel. Darüber hinaus ist denkbar, dass bei Regen feine Staubpartikel von Fahrzeugen gespült und vorwiegend im Bereich der Radspur in das Fugenmaterial eingetragen werden.

Inwiefern sich eine räumlich begrenzte Reduktion des Versickerungsvermögens auf das Abfluss- und Versickerungsverhalten einer Gesamtfläche auswirkt, hängt sicherlich von der räumlichen Ausdehnung der jeweiligen Bereiche bzw. von ihrem Flächenanteil an der Gesamtfläche ab. Ist der beeinträchtigte Flächenanteil relativ gering, ist es durchaus möglich, dass ein Teil des an dieser Stelle nicht versickerbaren Wassers auf die angrenzenden Flächenbereiche fließt und dort versickert, insbesondere wenn das Versickerungsvermögen dort deutlich höher ist. Bodenvertiefungen, in denen sich Pfützen bilden, wirken dem allerdings entgegen.

Ein Vergleich der in Lingen gewonnen Messdaten mit den Versickerungsraten, die aus den Beregnungsversuchen von Timmermann ermittelt wurden (siehe Kapitel 4.3), zeigt, dass bei den Infiltrometertests an den minder belasteten Stellen vorwiegend höhere, in der stärker durch Fahrzeugbewegungen belasteten Bereichen niedrigere Werte gefunden wurden. Das Verhältnis zwischen stärker und minder belasteten Bereichen wird auf einem Stellplatz in der Größenordnung von 1:1 bis 1:2 liegen. Eine Mittelung der an den verschiedenen Messpunkten gefunden Infiltrationsraten diesem Verhältnis entsprechend deckt sich etwa mit den nach Timmermann ermittelten Versickerungswerten der Gesamtfläche. Allerdings reicht der Umfang der Messdaten nicht aus, um diesen Sachverhalt genauer analysieren und bewerten zu können.

Auf einem Parkplatz in Gelsenkirchen¹¹⁹ 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 (siehe Abbildung 26)¹²⁰.



Abbildung 26: Untersuchungsflächen am Standort Gelsenkirchen

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. Die Infiltrationsverläufe an den drei Messpunkten sind in Abbildung 27 grafisch dargestellt.

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. Zu Beginn der Versuche nahmen die Infiltrationsraten, bedingt durch das grobporige Fugenmaterial, besonders rasch ab, da 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.

¹¹⁹ Parkplatz der Veltins Arena

¹²⁰ Hersteller: behaton; Pflasterstein: DV-öko; Fugenmaterial: Splitt 2/5 mm



Abbildung 27: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an Sickerfugenpflaster mit splittgefüllten Sickerkammern

Abbildung 27 verdeutlicht darüber hinaus den großen Wertebereich, in dem das Infiltrationsvermögen einer Pflasterbauweise nach mehrjähriger Nutzung streuen kann. So ergaben sich bei den drei Versuchen Endinfiltrationsraten von rd. 400 $I/(s\cdotha)$, 600 $I/(s\cdotha)$ sowie von 900 $I/(s\cdotha)$.

Die höchsten Infiltrationsraten wurden dabei an einem Messpunkt im Radspurbereich gefunden. Inwiefern hier eine weniger ausgeprägte Nachverdichtung oder Kolmation vorgelegen hat, kann anhand der Messwerte allein nicht beurteilt werden. Jedoch erfolgt die Degression der anfänglich hohen Versickerungsrate an dieser Stelle auch deutlich langsamer und weniger schlagartig als an den beiden anderen Messpunkten. Dies spricht dafür, dass an dieser Stelle das Fugenmaterial weiter gestuft ist und sich entsprechend das maßgeblich die hydraulische Leitfähigkeit beeinflussende Porengefüge von den anderen Messpunkten unterscheidet.

An dem Messpunkt mit den geringsten Infiltrationsraten waren die Sickerkammern deutlich vermoost und leicht verkrautet. Inwiefern dies die Versickerungsleistung herabsetzt, kann anhand der vorliegenden Daten jedoch nicht eindeutig bewertet werden. In den Untersuchungen von Nolting et al. (2005) ist dieses Phänomen ebenfalls dokumentiert (siehe Kap. 2.4). Optisch waren ansonsten keine Unterschiede an den drei Testflächen auszumachen.

Im Vergleich zu den am Standort Lingen untersuchten Pflasterbauweisen aus Betonsteinen mit umlaufend aufgeweiteten Fugen sowie aus Sickerfugensteinen mit eingearbeiteten Ableitungsrinnen weist der in Gelsenkirchen untersuchte Belag aus Sickerkammersteinen ein insgesamt höheres Infiltrationsvermögen auf (siehe Abbildung 28).

Inwiefern generell Beläge mit splittgefüllten Kammern versickerungsfähiger sind als Bauweisen mit umlaufenden, splittgefüllten Fugen bei gleichem Öffnungsanteil, kann anhand der hier gewonnen Daten nicht beurteilt werden. Frühere in der Fachliteratur dokumentierte Untersuchungen (siehe Kap. 2.4) deuten darauf hin, dass Pflasterbauweisen mit splittgefüllten Fugen und Kammern dauerhaft eine sehr hohe Versickerungsleistung aufweisen können. Verantwortlich ist hierfür offenbar das Phänomen, dass sich auf Splittschüttungen verschlämmende Feinpartikel nicht so leicht anlagern können, sondern vielfach durch das grobkörnige Porengefüge des Fugenmaterials hindurch in tiefere Horizonte geschwemmt werden.



Abbildung 28: Gegenüberstellung der Versickerungsleistungen der untersuchten Sickerfugenbeläge

Im Rahmen der Felduntersuchungen wurden noch an zwei weiteren Standorten Versickerungsversuche mittels Tropf-Infiltrometer durchgeführt. Dabei wurden Pflasterbeläge aus Porenbetonsteinen auf einem Busparkplatz des Wallfahrtsortes Kevelaer sowie auf einem Schulhof in Straelen betrachtet (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30).¹²¹

¹²¹ 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



Abbildung 29: Untersuchungsflächen am Standort Kevelaer (Busparkplatz)



Abbildung 30: Untersuchungsflächen am Standort Straelen (Schulhof)

Die Infiltrationsraten an den untersuchten Messpunkten waren – mit einer Ausnahme – sehr hoch und weisen nahezu durchweg Werte von z.T. deutlich über 1.000 l/(s·ha) auf. Abbildung 31 zeigt die Gegenüberstellung der Messwerte an beiden Standorten.



Abbildung 31: Bandbreite der in Straelen und Kevelaer gemessenen Versickerungsraten an Pflasterbelägen aus haufwerksporigen Betonsteinen

Auf dem Busparkplatz in Kevelaer wurde jedoch auch ein Bereich untersucht, auf dem großflächig eine rote Asche¹²² 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).

Auffällig sind hier zudem 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 31 einmal mehr die – auch kleinräumig anzutreffende – hohe Variabilität im Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger Pflasterbauweisen.

¹²² eine exakte Spezifizierung dieses feinkörnigen, rotfarbigen Materials war nicht möglich

4.1.2 Vergleichsmessungen mittels Doppelring-Infiltrometer

Die mit Hilfe eines einfachen Doppelring-Infiltrometers durchgeführten Versickerungsversuche auf Bestandsflächen zielen in erster Linie darauf ab, die kleinräumige Variabilität des Versickerungsvermögens näher zu analysieren. An acht Standorten wurden fünf unterschiedliche Belagsarten (Abbildung 32) untersucht, wobei je Standort bis zu 21 Einzelmessungen durchgeführt wurden¹²³. Einige Messpunkte wurden dabei mehrfach beprobt.



Abbildung 32: Untersuchte Pflasterbelagsarten auf dem Campusgelände der Technischen Universität Kaiserslautern¹²⁴

Die Bandbreite der je Pflastertyp gemessenen Versickerungsraten ist in Abbildung 33 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Minimal-, Mittel- und Maximalwerte der je Pflastertyp nach 10, 20 und rd. 60 Minuten Versuchsdauer aufgetretenen Versickerungsraten (f_{10} , f_{20} , f_{60}).¹²⁵

Für den untersuchten Belag aus begrüntem Rasenpflaster wurden Infiltrationsraten zwischen rd. 200 l/(s·ha) und knapp 600 l/(s·ha) gefunden, wobei das Versickerungsvermögen über die Versuchsdauer von rd. einer Stunde an allen drei Messpunkten nahezu konstant blieb. An den fünf betrachteten Messpunkten eines fugenarmen Pflasterbelages aus porösen Betonsteinen schwankte das Versickerungsvermögen zwischen 150 l/(s·ha) und 400 l/(s·ha). Für einen Belag aus kleinteiligem Mosaikpflaster ergab sich bei ebenfalls fünf Versuchen eine Schwankungsbreite von 80-480 l/(s·ha). Das Versickerungsvermögen, das in vier Einzelversuchen an einem fugenarmen Plattenbelag angetroffen wurde, lag deutlich niedriger und schwankte zwischen 20 l/(s·ha) und 220 l/(s·ha).

Aufgrund des geringen Umfangs an Einzelmessungen haben die dargestellten Kennwerte bei diesen vier Belagstypen sicherlich keine statistische Aussagekraft. Dennoch unterstreichen sie, dass das Versickerungsvermögen auch bei diesen

¹²³ siehe Kapitel 3.2

¹²⁴ von links nach rechts: Rasengitter, Porenbetonpflaster, Mosaikpflaster, Normalpflaster (hier: Doppelverbundpflaster), Plattenbelag

¹²⁵ Es sei angemerkt, dass den dargestellten statistischen Kennwerten der verschiedenen Pflastertypen eine variierende Anzahl an Einzelmessungen zu Grunde liegt.

Belagstypen kleinräumig innerhalb von wenigen Metern auf ein und derselben Pflasterfläche in einem beträchtlichen Wertebereich variieren kann¹²⁶. Selbst bei der z.T. sehr geringen Anzahl an Einzelmessungen unterscheiden sich die Minimal- und Maximalwerte um einen Faktor zwischen zwei und zehn.



Abbildung 33: Variationsbreite der Versickerungsrate für fünf untersuchte Belagsarten auf dem Campusgelände der TU Kaiserslautern

Eine deutlich größere Anzahl an Einzelmessungen liegt den dargestellten Wertebereichen für fugenarmes Normalpflaster zu Grunde. Für diesen Belagstyp wurden an vier unterschiedlichen Standorten insgesamt 54 Einzelmessungen durchgeführt. Daher überrascht es wenig, dass die Streubreite des Versickerungsvermögens mit Werten zwischen 6 l/(s·ha) und 540 l/(s·ha) nochmals deutlich größer ausfällt, als bei den anderen Belagsarten der Messserie. Zwischen den geringsten und den höchsten gemessenen Kennwerten der Infiltrationsrate liegen hier fast zwei Zehnerpotenzen.

Mit Ausnahme des Rasengitterbelages ist bei allen Flächenbelägen eine moderate Abnahme der Versickerungsleistung über die Versuchsdauer auch in der Darstellung der statistischen Kennwerte der Messergebnisse erkennbar. Sowohl die Minima und Maxima als auch die Mittelwerte je Belagstyp zeigen eine degressive Entwicklung über die Versuchsdauer (f_{10} bis f_{60}). Die Mittelwerte aus allen Messungen an den betrachteten Belagstyp übersteigen dabei für alle Versuchszeitpunkte einen Wert von beachtlichen 100 l/(s·ha).

¹²⁶ Vergleichstests an jeweils gleichen Messpunkten haben gezeigt, dass die kleinräumige Variabilität des Versickerungsvermögens die messtechnisch bedingte Variabilität um ein Vielfaches übersteigt.

In Abbildung 34 sind für den Belagstyp des konventionellen, fugenarm verlegten Betonpflasters die an den vier unterschiedlichen Standorten vorgefunden Bandbreiten des Versickerungsvermögens einander gegenüber gestellt. Dargestellt sind die Minima, Maxima und Mediane der je Standort zu verschiedenen Versuchszeitpunkten aufgetretenen Infiltrationsraten (f_{10} , f_{20} , f_{30} , f_{60}). Abbildung 35 zeigt die Pflasterdeckungen der einzelnen Standorte.



Abbildung 34: Variationsbreite der Versickerungsrate für konventionelles fugenarm verlegtes Betonpflaster an vier untersuchten Standorten



Abbildung 35: Untersuchte Pflasterbauweisen aus fugenarmem Rechteck- und Verbundpflaster (Infiltrometertests TU Kaiserslautern)

Eine besonders große Variation im Versickerungsvermögen wurde auf dem relativ gering frequentierten Parkplatz vor Halle 67 der Technischen Universität Kaiserslautern mit Infiltrationsraten zwischen 10 l/(s·ha) und 540 l/(s·ha) vorgefunden. Dies mag zum einen daran liegen, dass an diesem Standort die meisten Vergleichsmessungen aller betrachteten Standorte durchgeführt wurden. Bei dieser Untersuchungsfläche fällt jedoch die Betrachtung atypischer Messpunkte in besonderem Maße in Gewicht. Die Messpunkte umfassen hier sowohl extrem kolmatierte als auch nahezu kolmationsfreie Bereiche. Einige Messungen wurden in einem Flächenteil durchgeführt, bei dem in Folge einer Erdbaumaßnahme sehr feines Erdmaterial flächig in die Fugen eingetragen wurde. Ein anderer, mehrfach beprobter Messpunkt liegt im überdachten und damit auch bei Regen in der Regel trockenen Eingangsbereich eines Gebäudes (Halle 67), bei dem der Fugenraum auch augenscheinlich nur in äußerst geringem Maß durch eingetragen Feinpartikel beeinträchtigt ist. Dieser Bereich repräsentiert gewissermaßen das Versickerungsvermögen des Belages im annähernden Neuzustand.

Bei den drei übrigen Standorten aus fugenarm verlegtem Betonpflaster variieren die Versickerungsraten zwischen 6 l/(s·ha) und rd. 200 l/(s·ha). Die Mediane der Anfangsversickerungsraten nach rd. 10 Minuten Versuchsdauer bewegen sich hier in einem Wertebereich von 35-125 l/(s·ha); die Mediane der Endversickerungsraten nach rd. 60 Minuten Versuchsdauer variieren zwischen 35 l/(s·ha) und 85 l/(s·ha). Diese Werte spiegeln die Größenordnung des Versickerungsvermögens konventioneller Betonpflasterflächen wider.

Eine Aussage über den Zusammenhang zwischen der verkehrlichen Belastung und dem Versickerungsvermögen lässt sich dagegen aus der Ergebnisdarstellung in Abbildung 34 nicht unmittelbar ableiten. Die Messreihen enthalten in unterschiedlichem Umfang Messungen in Bereichen höherer und geringerer mechanischer Beanspruchung und müssen daher nicht repräsentativ für die überwiegende Flächennutzung der einzelnen Standorte sein. Dieser Aspekt wird in Kapitel 4.2 näher beleuchtet.

Dennoch soll anhand der Vergleichsmessungen auf dem Campusgelände der Technischen Universität Kaiserslautern die lokale Variabilität im Versickerungsmögen zwischen nah beieinander liegenden Messpunkten unterschiedlicher Nutzungstypologie und Beanspruchung analysiert werden. In Abbildung 36 sind hierzu die auf dem gering frequentierten Parkplatz vor Halle 67 in Flächenbereichen unterschiedlicher Nutzung registrierten Versickerungsraten mit ihr statistischen Kennwerten einander gegenüber gestellt (Minima, Maxima, Mediane für verschiedene Versuchszeitpunkte).

Die Wertespektren der Versickerungsraten f_{10} bis f_{60} , die an jenen Messpunkten registriert wurden, denen eine vergleichsweise hohe mechanische Beanspruchung durch Kraftfahrzeuge zugeordnet werden kann, liegen erheblich unterhalb der Wertebereiche, die an Messpunkten mit deutlich geringerer verkehrliche Inanspruchnahme registriert wurden. Der vor Regen geschützte Eingangsbereich weist vielfach ein noch höheres Versickerungsvermögen auf. Die besonders kolmatierten Bereiche an diesem Standort (s.o.) sind hier nicht separat dargestellt. Gegenüber den stark durch Kraftfahrzeuge genutzten Bereichen ist das Versickerungsvermögen dort nochmals erheblich herabgesetzt.



bundpflasterbelages differenziert nach Nutzungsbereichen (Parkplatz Halle 67, TU Kaiserslautern)

Abbildung 37 zeigt die Gegenüberstellung von Messwertbereichen, die auf einem mittel bis stark frequentierten Parkplatz aus fugenarm verlegtem Doppelverbundpflaster (Parkplatz vor Gebäude 14, TU Kaiserslautern) in Flächenbereichen unterschiedlicher Inanspruchnahme durch Kraftfahrzeuge registriert wurden. Dabei wurde differenziert zwischen Bereichen mit relativ geringer und unregelmäßiger Beanspruchung durch Kraftfahrzeuge jeweils im Zentrum eines Stellplatzes sowie Bereichen mit regelmäßiger und vergleichsweise hoher Belastung durch Kraftfahrzeuge jeweils im Fahrspurbereich eines Stellplatzes (siehe hierzu auch Abbildung A - 14 im Anhang). Hierbei wird unterstellt, dass die Fahrzeuge meist in den vorgesehenen Parkbuchten geparkt werden. Diese Annahme wird durch Beobachtungen gestützt.

Dargestellt sind die jeweiligen Bandbreiten sowie die Mittelwerte der Versickerungsraten nach 10-, 20-, 30- und 60-minütiger Versuchsdauer. Beiden Datensätzen liegen jeweils acht Einzelmessungen an jeweils unterschiedlichen Messpunkten zu Grunde. In der Gegenüberstellung bestätigt sich, dass in Flächenbereichen besonders ausgeprägter mechanischer Beanspruchung das Versickerungsvermögen in der Regel deutlich herabgesetzt ist (vgl. Kapitel 4.1.1). Dieses Phänomen wurde bei nahezu allen im Rahmen dieser Arbeit beprobten Flächen und unabhängig von der Messmethode beobachtet. Die gegenüber den minder belasteten Bereichen reduzierten Versickerungsleistungen in diesen Flächenbereichen sind bei allen Messreihen signifikant und weisen bei dem hier dargestellten Objekt Mittelwerte in der Größenordnung von 35-50 l/(s·ha) auf. Hier ist zudem eine entsprechend geringere kleinräumige Variabilität der Versickerungsleistungen zu beobachten. Die Versickerungsleistungen in den minder beanspruchten Bereichen variieren zwischen 50 l/(s·ha) und 200 l/(s·ha) bei Mittelwerten zwischen 120 l/(s·ha) und 155 l/(s·ha) je nach betrachtetem Versuchszeitpunkt. Die Versickerungsleistung liegen hierbei allerdings deutlich unterhalb der Versickerungsleistungen, die auf dem weitaus geringer frequentierten Parkplatz der Halle 67 an vergleichbaren Messpunkten vorgefunden wurden (vgl. Abbildung 36). Dies unterstreicht nochmals den möglichen Einfluss der Flächennutzung auf das kleinräumige Versickerungsvermögen.



Abbildung 37: Bandbreite des Versickerungsvermögens eines konventionellen Verbundpflasterbelages bei unterschiedlicher Beanspruchung durch Kraftfahrzeuge (Parkplatz Gebäude 14, TU Kaiserslautern)

Im Zuge der Versuchsreihe auf dem Campusgelände der Technischen Universität Kaiserslautern wurde des Weiteren untersucht, inwieweit das Versickerungsvermögen vom Witterungsverlauf vor Versuchsbeginn beeinfluss wird. Hierzu wurden an verschiedenen Messpunkten Infiltrationsversuche mehrfach wiederholt, wobei allen Einzelversuchen eine unterschiedlich lange Trockenperiode seit dem letzten Regenereignis vorangegangen war. Die an drei verschiedenen Messpunkten auf dem Parkplatz vor Halle 67 festgestellten Versickerungsleistungen nach 10- und 60-minütiger Versuchsdauer sind in Abbildung 38 dargestellt.

Die Abbildung zeigt die im überdachten Eingangsbereich des Gebäudes 67 (Messpunkt MP A als Referenzpunkt), in einem mäßig durch Kraftfahrzeuge beanspruchten Parkplatzbereich (MP B) sowie in der Fahrspur eines regelmäßig genutzten Stellplatzes (MP C) gemessenen Versickerungsraten. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Trockenperiode vor Versuchsbeginn und der Versickerungsleistung ist dabei weder zu Beginn der Versuche noch gegen Ende der Versuche nach rd. 60 Minuten festzustellen.



Abbildung 38: Versickerungsleistungen eines fugenarmen Verbundpflasterbelages in Abhängigkeit von der vorangegangenen Trockenperiode (Parkplatz Halle 67, TU Kaiserslautern)

Da bei den einzelnen Messungen der Grad der Vorbefeuchtung in Fugen und Bettung nicht bekannt ist, kann aus den Ergebnissen nicht unmittelbar geschlossen werden, dass zwischen dem Wassergehalt im Oberbau der Pflasterung und dem Versickerungsvermögen des Deckbelages grundsätzlich kein Zusammenhang besteht. Dennoch scheint die zeitliche Abfolge von Regenereignissen bereits bei Trockenperioden von mehreren Stunden keinen ausgeprägten Einfluss auf das Versickerungsvermögen zu haben. Die ausgeglichenen Messwerte an den einzelnen Messpunkten dokumentieren vielmehr, dass auch mit der vergleichsweise einfachen Messmethodik mittels Doppelring-Infiltrometer absolut plausible und reproduzierbare Messergebnisse erzielt werden können.

4.1.3 Fazit der Feldversuche an Bestandsflächen

Die z.T. beachtlich hohen Versickerungsleistungen der verschiedenen Pflasterbauweisen auch nach vieljähriger Liegezeit bestätigen vielfach die in der Literatur genannten Wertebereiche (vgl. Tabelle 7); liegen teilweise aber auch darüber.

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 der Eintrag von Feinpartikeln in die Fugen. Kolb et al. (1998 und 2000) haben zudem 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.

Insbesondere bei Plasterbauweisen, bei denen die Versickerung über die Fugen erfolgt, spielt die Durchlässigkeit des Fugenmaterials eine übergeordnete Rolle
hinsichtlich der Versickerungsfähigkeit der Gesamtkonstruktion. Das Versickerungsvermögen des Fugenmaterials nimmt im Laufe der Liegezeit einer Pflasterfläche infolge fortschreitender Kolmation ab. Das Ausmaß der Kolmation hängt wiederum von vielfältigen standortspezifischen Faktoren ab und kann auch innerhalb eines Standortes erheblich variieren. Darüber hinaus scheinen feinkörnigere Fugenmaterialien empfindlicher gegenüber Kolmationserscheinungen zu sein 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.

Die vielfältigen, das Versickerungsvermögen beeinflussenden Faktoren spiegeln sich in der enormen Variabilität der an Bestandsflächen gemessenen Infiltrationsraten wider und dokumentieren dessen ausgeprägten stochastischen Charakter. Die Infiltrationsleistung kann dabei auch sehr kleinräumig in erheblichem Maße schwanken.

Im Zuge der Vergleichsmessungen auf dem Campusgelände der Technischen Universität Kaiserslautern wurden Abweichungen in den Versickerungsleistungen um bis zu zwei Zehnerpotenzen in einem Umkreis von wenigen Metern gefunden. Vielfach traten an den unterschiedlichen Messpunkten eines Standortes Variationsbreiten von 200-400 l/(s·ha) auf. Bei besonders versickerungsaktiven Pflasterbauweisen mit insgesamt höherem Versickerungsvermögen wie bspw. Porenbeton- oder Sickerfugenpflaster können durchaus noch deutlich größere Schwankungen auftreten.

Hinsichtlich des Abflussverhaltens einer größeren Fläche bedeutet dies, dass bei einem Regenereignis auf einigen Flächenbereichen das Infiltrationsvermögen bereits erreicht sein kann und hier entsprechend ein Oberflächenabfluss einsetzt, während auf anderen Flächenbereichen das Versickerungsvermögen noch nicht erschöpft ist und der niedergehende Regen vollständig versickert. Folglich ist auch bei schwächeren Regen mit einem – wenn auch geringen – Abflussbeitrag von durchlässig befestigten Flächen zu rechnen.

Darüber hinaus konnte im Rahmen der Vergleichsmessungen gezeigt werden, dass in Flächenbereichen erhöhter mechanischer Beanspruchung wie bspw. der überwiegenden Fahrspur von Stellplatzflächen im Vergleich zu minder belasten Bereichen in der Regel signifikant reduzierte Infiltrationsraten auftreten. Die Versickerungsleistungen können hier um einen Faktor in der Größenordnung von 2-5 differieren. Neben der Nachverdichtung des Oberbaus und insbesondere der Pflasterbettung kann in diesen Bereichen auch die Ausbildung von Spurrillen als bevorzugte oberflächige Fließwege zur Abnahme des Versickerungsvermögens beitragen, da sie den Eintrag von mitgeschwemmten Feinpartikeln begünstigen. Zudem ist in diesen Bereichen mit einem erhöhten Aufkommen an Feinmaterial zu rechnen, da sowohl Feinstäube beim Bremsvorgang von Kraftfahrzeugen von den Bremsscheiben abgerieben als auch bei Regen von geparkten Fahrzeugen abgespült werden.

Eine flächentypspezifische Quantifizierung der Auftretenswahrscheinlichkeiten bestimmter Versickerungsleistungen ist anhand der durchgeführten Messreihen dagegen nicht möglich, da die Datenbasis hierzu allein nicht ausreicht. Dieser Aspekt wird jedoch auf der Grundlage einer deutlich breiteren Datenbasis im nachfolgenden Kapitel näher beleuchtet.

4.2 Statistische Analyse des Infiltrationsvermögens

Durch Aggregation der Messdaten verschiedener Untersuchungen zum Versickerungsvermögen wurde eine Datenbasis geschaffen, die sowohl die messtechnisch erfassten Versickerungsleistungen als auch die standortspezifischen Charakteristika von mehreren hundert Pflasterflächen im Gebrauchszustand umfasst (siehe Kapitel 3.3). Diese Datenbasis ermöglicht die statistische Evaluierung unterschiedlicher Pflasterbauweisen hinsichtlich der Auftretenshäufigkeiten bestimmter Infiltrationsleistungen sowie die Beurteilung verschiedener Standortbedingungen hinsichtlich ihres tendenziellen Einflusses auf das Versickerungsvermögen.

4.2.1 Häufigkeitsverteilungen der Versickerungsleistung

In einem ersten Schritt wurden die gemessenen Versickerungsleistungen mit ihren Auftretenshäufigkeiten korreliert. Hierzu wurden die erfassten Infiltrationsraten der Größe nach sortiert und die zugehörigen Unterschreitungshäufigkeiten aus dem jeweiligen Rang sowie dem Umfang der Datenreihe ermittelt. Abbildung 39 zeigt die Verteilung der Endinfiltrationsraten fünf gängiger Pflasterarten nach ihrer statistischen Unterschreitungshäufigkeit.



Abbildung 39: Häufigkeitsverteilung der Endinfiltrationsraten verschiedener Pflasterbauweisen¹²⁷

¹²⁷ Für andere als die hier aufgeführten Pflastertypen reicht der Umfang an vorliegenden Messdaten zur Darstellung einer qualifizierten Häufigkeitsverteilung nicht aus.

Die Grafik verdeutlicht die enorme Streubreite des Versickerungsvermögens, zu deren Darstellung gar eine logarithmische Achsenskalierung erforderlich ist. Der Wertebereich reicht von Versickerungsleistungen unter 10 l/(s·ha) bis über 10.000 l/(s·ha). Bei nahezu allen dargestellten Belagsarten liegen zwischen 10%und 90%-Perzenzentilwert der Versickerungsrate rd. zwei Zehnerpotenzen, wobei die beiden unteren Quartile¹²⁸ einen deutlich kleineren Wertebereich umfassen als die beiden oberen Quartile¹²⁹.

Die ausgeprägte Variabilität des Versickerungsvermögens ist bedingt durch eine Vielzahl von örtlichen und baulichen Einflussfaktoren. Dominierend ist dabei die Anlagerung von Feinpartikeln in den oberen Schichten des mineralischen Fugenmaterials und ggf. der porösen Deckschicht. In Abbildung 39 sind daher verschiedenen Wertebereichen der Auftretenswahrscheinlichkeit unterschiedliche Kolmationsgrade zugeordnet. Die Zuordnung wurde dabei nach fachlichem Ermessen getroffen und soll lediglich die bei unterschiedlichen Kolmationsgraden zu erwartenden Wertebereiche des Versickerungsvermögens kennzeichnen.

Für konventionelles Funktionspflaster¹³⁰ mit schmalen sandverfüllten Fugen ergibt sich aus der Datenreihe mit 162 Einzelmessungen ein Median von 55 l/(s·ha). Bei ca. 20% der Messungen liegt die Endversickerungsrate unter 20 l/(s·ha), bei ca. 15% der Messungen beträgt sie nahezu null. Anderseits weisen rd. 25% der Messungen Versickerungsleistungen von über 150 l/(s·ha) auf, rd. 15% der Messungen gar von über 200 l/(s·ha). Die größte gemessene Versickerungsleistung der Datenreihe beträgt knapp 600 l/(s·ha).

Für Beläge aus konventionellen, in Sand verlegten Pflastersteinen jedoch mit größeren Fugenanteilen von über 6% resultieren deutlich höhere Versickerungsleistungen. Der Median aus der mit 25 Einzelmessungen allerdings deutlich kleineren Datenbasis beträgt hier rd. 650 l/(s·ha). Lediglich 20% der Messwerte unterschreiten eine Versickerungsvermögen von 150 l/(s·ha); 45% der Messwerte übersteigen 1000 l/(s·ha).

Für Rasengitterbeläge liegt der Median aus der mit 39 Einzelmessungen ebenfalls vergleichsweise kleinen Datenbasis bei rd. 220 l/(s·ha). Bei über 85% der Messungen werden Versickerungsleistungen von über 100 l/(s·ha) erreicht. Ein Viertel der Messwerte weist Versickerungsleistungen von über 500 l/(s·ha) auf. Versickerungsraten unter 50 l/(s·ha) treten lediglich bei 10% der Messungen auf. Insgesamt überrascht, dass das Versickerungsvermögen der Rasengitterbeläge

 $^{^{128}}$ Werte \leq Median bzw. Werte mit Unterschreitungshäufigkeit $\leq 50\%$

¹²⁹ Werte \geq Median bzw. Werte mit Unterschreitungshäufigkeit \geq 50%

¹³⁰ fugenarmes Rechteck- und Verbundpflaster (Fugenanteil < 6%)

deutlich unterhalb des Versickerungsvermögens des weit verfugten Normalpflasters liegt.

Für besonders versickerungsaktiv gestaltete Pflasterbauweisen wie fugenarmes Porenbetonpflaster oder Sickerfugenpflaster mit breiten splittverfüllten Fugen zeigen die Messdaten vielfach beachtlich hohe Versickerungsleistungen. Bei beiden Belagstypen beträgt der Median rd. 900 l/(s·ha). Lediglich 15% der Messwerte unterschreiten ein Versickerungsvermögen von 100 l/(s·ha). Gleichwohl ist auch bei diesen Belagsarten eine extreme Kolmation möglich, die sich in Versickerungsleistungen von unter 50 l/(s·ha) äußert.

Inwieweit die in der Datenbasis enthaltenen Messpunkte hinsichtlich ihrer Standortcharakteristika wie Flächennutzung, verkehrlicher Inanspruchnahme, Liegezeit u.ä. repräsentativ für die Gesamtheit der Pflasterflächen in Deutschland sind, kann nicht beurteilt werden. Hierzu wären statistische Kennwerte zu den entsprechenden Charakteristika erforderlich, die allerdings weder für die Fläche der Bundesrepublik noch für exemplarische Stadtgebiete oder Stadtteile vorliegen (vgl. Kapitel 2.1). Angesichts der Vielfältigkeit der enthaltenen Standortbedingungen und des mitunter großen Umfangs an Einzelmessungen¹³¹ wird jedoch unterstellt, dass die Datenbasis die realen Verhältnisse zumindest näherungsweise widerzuspiegeln vermag.

Mit der in Abbildung 39 dargestellten Grafik kann daher erstmals die Infiltrationskapazität mit einer größenordnungsmäßigen Auftretenshäufigkeit korreliert und somit der ausgeprägte stochastische Charakter des Versickerungsvermögens mit den ausgewiesenen Zahlenwerten auch quantitativ umschrieben werden. Dies stellt einen ungemeinen Kenntnisfortschritt dar. Fiel es bislang angesichts der starken Variabilität bereits schwer, eine mittlere Größenordnung flächentypspezifischer Versickerungsleistungen zu benennen, können nun sowohl statistisch untermauerte Mittelwerte als auch selten auftretenden Wertebereiche zugeordnet werden. Mit der verbesserten Kenntnis der stochastischen Verteilung des Versickerungsvermögens eröffnet sich damit die Möglichkeit, das stark variable Versickerungsverhalten von Pflasterbauweisen im Rahmen entwässerungstechnischer Planungen besser als bislang berücksichtigen zu können.

¹³¹ insbesondere für konventionelles Funktionspflaster aus fugenarm verlegten Pflastersteinen

4.2.2 Bauliche und standortspezifische Einflussfaktoren auf das Versickerungsvermögen

Neben der Ermittlung der flächentypspezifischen Häufigkeitsverteilungen wurde die gesammelte Datenbasis dazu genutzt, den Einfluss verschiedener baulicher und standortspezifischer Einflussfaktoren auf das Versickerungsvermögen näher zu analysieren. Hierzu wurden die Messwerte u.a. nach Flächennutzung, verkehrlicher Belastung, Liegezeit, Fugenanteil und Fugenmaterial differenziert ausgewertet.

Abbildung 40 zeigt die gemessenen Endversickerungsraten für den Belagstyp des konventionellen fugenarm verlegten Rechteck- oder Verbundpflasters in Abhängigkeit vom jeweiligen Fugenanteil. In den vier einzelnen Diagrammen sind die jeweiligen Nutzungskategorien, das Ausmaß der Flächenbeanspruchung durch Kraftfahrzeuge, die Liegezeit der untersuchten Fläche sowie die Körnungsgruppe des verwendeten Fugenmaterials gekennzeichnet.

Die Messwerte zeichnen sich durch eine ausgesprochene Heterogenität aus und untermauern, dass keine der betrachteten Randbedingungen einen dominierenden Einfluss auf das Versickerungsvermögen aufweist. Eine strenge Korrelation des Versickerungsvermögens mit dem Fugenanteil ist ebenso wenig gegeben wie mit der Körnungsstruktur des Fugenmaterials. So äußert sich ein zunehmender Fugenanteil nicht zwangsläufig durch eine tendenzielle Zunahme der Infiltrationsleistung im Gebrauchszustand. Grobkörnigere oder weiter gestufte Fugenmaterialien führen nicht zwangsläufig zu einem höheren Versickerungsvermögen. Stattdessen variiert die Infiltrationsleistung bei allen betrachteten Fugenkörnungen in einem großen Wertebereich. Lediglich bei einer Fugenfüllung aus Splitt mit Körnung von 2/5 mm ist eine in der Tendenz vergleichsweise hohe Versickerungsrate von über 100 l/(s·ha) auszumachen.

Bei der Differenzierung der Messergebnisse nach der Liegezeit nehmen Flächen längerer Nutzungsdauer tendenziell eher geringere Versickerungsraten ein, wobei diese Tendenz durchaus signifikant erscheint. Flächen mit einer Liegezeit von über fünf Jahren weisen überwiegend Versickerungsleistungen unter 100 l/(s·ha), jüngere Flächen überwiegend im Bereich von 50-200 l/(s·ha) auf. Gleichwohl werden bei allen betrachteten Alterskategorien sowohl sehr hohe als auch sehr niedrige Versickerungsraten erzielt, so dass letztlich auch die Liegezeit keine alleinig ausschlaggebende Randbedingung darstellt.

Zweifelsohne beeinflusst auch die Nutzungscharakteristik einer Pflasterfläche deren Versickerungsvermögen. Dennoch lässt auch die überwiegende Nutzung keinen unmittelbaren Rückschluss auf die zu erwartende Infiltrationsleistung zu. Unabhängig davon, ob es sich bei der betrachteten Fläche um eine Straße, einen Parkplatz, eine Fußgängerzone oder einen Rad- und Gehweg handelt, streuen die Versickerungsraten über nahezu das gesamte Wertespektrum. Die Betrachtung der Inanspruchnahme durch Kraftfahrzeuge liefert hier eine etwas eindeutigere Zuordnung. Zwar weisen Flächen mit einer hohen bzw. regelmäßigen Inanspruchnahme durch Kraftfahrzeuge überwiegend Versickerungsleistungen deutlich unter 100 l/(s·ha) auf, dennoch sind für ähnlich beanspruchte Flächenkategorien vielfach auch deutlich höhere Versickerungsraten von 150-200 l/(s·ha) und höher zu konstatieren. Flächen ohne oder mit lediglich geringer bzw. unregelmäßiger Beanspruchung durch Kraftfahrzeuge weisen Versickerungsleistungen in einem ebenso großen Wertebereich auf.





Endversickerungsraten konventioneller fugenarmer Funktionspflasterbeläge in Abhängigkeit von Fugenanteil, Fugenkörnung, Liegezeit, überwiegender Flächennutzung sowie verkehrlicher Belastung¹³²

¹³² Die Grafiken enthalten auch einige Messwerte aus konventionellem Funktionspflaster, das bereichsweise größere Fugenweiten und entsprechend größere Fugenanteile aufweist.

Der Einfluss der Inanspruchnahme einer Pflasterfläche durch Kraftfahrzeuge wird anhand der nachstehenden Abbildungen nochmals etwas detaillierter heraus gearbeitet. In Abbildung 41 sind für konventionelles Normalpflaster Minima, Maxima, Mittelwerte sowie verschiedene Perzentilbereiche für drei unterschiedliche Beanspruchungskategorien¹³³ einander gegenüber gestellt.



Abbildung 41: Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen fugenarmer Normalpflasterbeläge bei unterschiedlicher verkehrliche Beanspruchung

Die beiden Grafiken belegen einen eindeutigen (tendenziellen) Einfluss der Verkehrsbelastung auf das Versickerungsvermögen. Für Flächen mit einer vergleichsweise hohen und/oder regelmäßigen Verkehrsbelastung ergibt sich aus den verfügbaren Messdaten ein Mittelwert der Endversickerungsrate von rd. 85 l/(s·ha). Für Flächen mit geringer oder gar ohne Belastung durch Kraftfahrzeuge ergeben sich deutlich höhere Mittelwerte von rd. 120 l/(s·ha) und 140 l/(s·ha).

Dennoch können auch an überwiegend autofreien Standorten wie bspw. Fußgängerzonen flächenweit erheblich reduzierte Versickerungsleistungen auftreten (vgl. Abbildung 40). Eine geringe Inanspruchnahme durch Kraftfahrzeuge ist daher nicht unmittelbar mit einem hohen Versickerungsvermögen gleichzusetzen. Hier spielt die konkrete Nutzung und das damit verbundene Aufkommen feiner, kolmativ wirkender Schmutzstoffe ebenfalls eine wesentliche Rolle.¹³⁴

¹³³ Der Zuordnung der beprobten Standorte bzw. der Messwerte zu den unterschiedlichen Beanspruchungskategorien liegt dabei eine subjektive Einschätzung des Ausmaßes der verkehrlichen Nutzung zu Grunde. Die angegebenen Perzentile beziehen sich auf die statistische Unterschreitungshäufigkeit.

¹³⁴ Es ist davon auszugehen, dass regelmäßige Kehrvorgänge, insbesondere bei sehr intensiv durch Fußgänger genutzten, innerstädtischen Pflasterbelägen, zu einer verstärkten Kolmation der Flächen beitragen.

In der rechten Grafik sind die aufgetretenen Wertebereiche nach der Auftretenshäufigkeit untergliedert. Ein weiter Wertebereich entfällt jeweils auf hohe Infiltrationsraten mit einer Überschreitungshäufigkeit von lediglich 10%. Sowohl die 90%- als auch die 75%-Perzentilwerte weisen für Flächen geringerer Inanspruchnahme eindeutig höhere Versickerungsleistungen auf. Für die hoch belasten Flächen ergibt sich ein Median von rd. 50 l/(s·ha), während für die beiden geringer beanspruchten Flächenkategorien Werte von ca. 90 l/(s·ha) und 100 l/(s·ha) resultieren. Die Zentralwerte liegen damit insgesamt deutlich niedriger als die jeweiligen Mittelwerte.¹³⁵

Bei allen drei Flächenkategorien weist ein Viertel der Messwerte sehr geringe Versickerungsraten von unter 25 l/(s·ha) auf, die vermutlich in erster Linie auf besonders ausgeprägte Kolmationserscheinungen zurückzuführen sind. Ein erheblich reduziertes Versickerungsvermögen muss folglich nicht zwingend durch eine erhöhte Beanspruchung durch Kraftfahrzeuge bedingt sein sondern ist bei sämtlichen Flächennutzungen unabhängig von der verkehrlichen Inanspruchnahme zu beobachten.

Abbildung 42 zeigt die Verteilungen der Unterschreitungshäufigkeit für die drei Kategorien unterschiedlicher verkehrlicher Beanspruchung und veranschaulicht den signifikanten¹³⁶ Einfluss der Verkehrsbelastung auf das Versickerungsvermögen besonders deutlich.

Das Diagramm enthält darüber hinaus eine Häufigkeitsverteilung, die durch Multiplikation der Messwerte der hoch belasteten Pflasterflächen jeweils mit einem Faktor von 1,5 ermittelt wurde. Diese Verteilung der rechnerischen Unterschreitungshäufigkeit deckt sich in etwa mit der Häufigkeitsverteilung für gering belastete Flächen. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass bei Pflasterflächen aus konventionellem Normalpflaster mit hoher bzw. regelmäßiger Inanspruchnahme durch Kraftfahrzeuge ein gegenüber Flächen mit geringer oder seltener verkehrlicher Nutzung um rd. 30% reduziertes Versickerungsvermögen zu erwarten ist. Der bereits bei anderen Autoren¹³⁷ genannte Zusammenhang zwischen der Verkehrsbelastung und der Versickerungsleistung kann somit auf der verbesserten Datengrundlage bestätigt und mit einer quantitativen Größenordnung unterlegt werden.

¹³⁵ Die relativ große Differenz zwischen Median und Mittelwert ist Ausdruck der ausgeprägten Heterogenität der Messdaten. Einige wenige Messwerte ausgesprochen hoher Infiltrationsraten fallen hier bei der Ermittlung des arithmetischen Mittelwertes besonders ins Gewicht.

¹³⁶ Die Signifikanz, also der klare Zusammenhang zwischen zwei statistischen Variablen (hier Verkehrsbelastung und Versickerungsvermögen), wird im vorliegenden Fall aus der augenscheinliche Korrelation abgeleitet und ist nicht Ergebnis eines statistischen Signifikanztests.

¹³⁷ z.B. Borgwardt, S. (1995), S. 139 oder Kresin, C. et al. (1996)



Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung der Endinfiltrationsraten bei fugenarmem Normalpflaster differenziert nach der verkehrlichen Beanspruchung

Die fortschreitende Anlagerung von Feinpartikeln in der Deckschicht und die damit verbundene Abnahme der Versickerungsleistung werden häufig mit der Nutzungsdauer einer Pflasterfläche in Verbindung gebracht. Bisherige Untersuchungen berichten von einer sehr raschen Abnahme des Versickerungsvermögens nach Inbetriebnahme eine Fläche um bis zu einer Zehnerpotenz¹³⁸. Andererseits konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit gezeigt werden, dass auch nach langer und intensiver Nutzung einer Pflasterfläche hohe Infiltrationsleistungen erzielt werden können. Aus diesem Grund wird der Zusammenhang zwischen dem Versickerungsvermögen und der Liegezeit nachfolgend auf der Basis der gesammelten Messdaten näher analysiert.

Abbildung 43 zeigt wiederum für konventionelles, fugenarm verlegtes Funktionspflaster Minima, Maxima, Mittelwerte sowie verschiedene Perzentilbereiche. Dabei wird zwischen Liegezeiten kleiner und größer fünf Jahre differenziert.

Für die in der Datenbasis enthaltenen Flächen mit Liegezeiten unter fünf Jahren ergibt sich mit rd. 125 I/(s·ha) ein höherer Mittelwert der Endversickerungsrate als für Flächen mit einer längeren Nutzungsdauer, die einen Mittelwert von rd. 100 I/(s·ha) aufweisen. Der Median der jüngeren Flächen mit knapp 90 I/(s·ha) sowie die 25%-, 75% und 90%-Perzentilwerte liegen ähnlich deutlich über den entsprechenden Werten für die älteren Flächen (Median von rd. 50 I/(s·ha)), so dass auch der hier betrachtete Einfluss der Nutzungsdauer der Pflasterfläche als

¹³⁸ z.B. Borgwardt, S. (1995), S. 137



signifikant bewertet wird. Dies belegt auch die in Abbildung 44 dargestellte Gegenüberstellung der beiden Häufigkeitsverteilungen.

Abbildung 43: Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen fugenarmer Normalpflasterbeläge bei unterschiedlicher Nutzungsdauer



Abbildung 44: Häufigkeitsverteilung der Endinfiltrationsraten bei fugenarmem Normalpflaster differenziert nach der Nutzungsdauer der Fläche

Das Diagramm in Abbildung 44 enthält wiederum eine rechnerische Häufigkeitsverteilung, die aus der Verteilung für Liegezeiten unter fünf Jahren durch Multiplikation der Messwerte mit einem Reduktionsfaktor von 0,75 bestimmt wurde. Durch die pauschale Reduzierung der Messergebnisse ergibt sich eine rechnerische Häufigkeitsverteilung, die der Verteilung für Flächen mit längeren Nutzungsdauern von über fünf Jahren stark ähnelt. Flächen mit Liegezeiten von über fünf Jahren weisen demnach gegenüber Flächen mit Nutzungsdauern von bis zu fünf Jahren ein um etwa 25% reduziertes Versickerungsvermögen auf. Damit kann auch die tendenzielle Korrelation zwischen der Liegezeit und der Infiltrationsleistung einer Pflasterfläche – zumindest für den hier betrachteten Pflastertyp – qualitativ bestätigt und quantitativ unterfüttert werden.

An diesem Punkt stellt sich die Frage, in welchem Maße die beiden Einflussfaktoren Liegezeit und verkehrliche Belastung in der gegenseitigen Überlagerung das Versickerungsvermögen beinträchtigen. Hierzu wurden die Messwerte an Pflasterflächen aus fugenarmem Normalpflaster nach beiden Einflussfaktoren getrennt ausgewertet. Abbildung 45 zeigt die Bandbreite der Messwerte zwischen 25%und 75%-Perzentilwert der Endversickerungsrate sowie den jeweiligen Median differenziert nach Liegezeit und Belastungskategorie.



Abbildung 45: Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen fugenarmer Normalpflasterbeläge differenziert nach verkehrlichen Beanspruchung und Nutzungsdauer

Obwohl aufgrund der sehr weitgehenden Differenzierung die Anzahl der Messwerte der einzelnen Kategorien z.T. vergleichsweise gering ist, ergibt sich ein recht einheitliches Bild. Die Mediane wie auch die ausgewiesenen Perzentilwerte nehmen bei gleicher Liegezeit mit zunehmender Inanspruchnahme durch Kraftfahrzeuge ebenso ab wie die Median bei gleicher Verkehrsbelastung und zunehmender Liegezeit. Der Rückgang der Infiltrationsrate beträgt dabei 25%-75%. Kolmationserscheinungen scheinen mit zunehmender Verkehrsbelastung schneller fortzuschreiten. Dagegen ist nicht auszumachen, welcher der beiden Einflussfaktoren der dominierende ist.

Der Median der Endversickerungsrate bei kurzer Liegezeit von unter zwei Jahren und kaum verkehrlicher Belastung liegt um einen Faktor zehn höher als der Median bei langer Liegezeit von über fünf Jahren und hoher verkehrlicher Belastung. Die beiden Einflussfaktoren können sich hinsichtlich ihrer quantitativen Auswirkung auf das Versickerungsvermögen also durchaus verstärken. Die mitunter starke Abnahme des Versickerungsvermögen auf ein Viertel bis ein Zehntel im Vergleich zu Flächen mit deutlich kürzerer Liegezeit und/oder deutlich geringerer verkehrliche Belastung ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass relativ neue und schwach beanspruchte Flächen vielfach überaus große Infiltrationsleistungen aufweisen. Die hohen Abnahmefaktoren sollten daher nicht überbewertet werden, zumal die Mehrheit der Pflasterflächen in einem Siedlungsgebiet ein Alter von über fünf Jahren aufweisen dürfte. Im Vergleich der Pflasterflächen mit Liegzeiten von zwei bis fünf Jahren sowie von Liegezeiten über fünf Jahren ergibt sich ein entsprechend geringerer Rückgang der Versickerungsrate um ca. 20%-35%.

Für eine derart aufgeschlüsselte Datenanalyse mit einer sehr weitgehenden Differenzierung der Messwerte nach mehreren Standort- und Nutzungsfaktoren reicht die Datenbasis bei den übrigen Pflasterflächen mit maximal 45 Datensätzen je Flächentyp nicht aus. Dennoch lassen sich in der Gegenüberstellung der statistischen Kennwerte für verschiedene Randbedingungen eindeutige Tendenzen ablesen (siehe zugehörige Abbildungen im Anhang).

So bestätigt sich auch bei besonders versickerungsfähig ausgebildeten Pflasterbauweisen¹³⁹ eine mit der Liegezeit fortschreitende Kolmation, die sich in einem mit der Nutzungsdauer abnehmenden Versickerungsvermögen widerspiegelt. Nichtsdestotrotz weisen diese Flächentypen selbst nach vergleichsweise langen Nutzungsdauern von über fünf Jahren im Mittel noch Versickerungsleistungen von über 1000 l/(s·ha) auf. Für Rasengitterbeläge bestätigt sich der Einfluss der Liegezeit ebenso, wobei hier allerdings im Mittel deutlich geringere Versickerungsleistungen zu verzeichnen sind. Der Median der Versickerungsrate liegt bei Rasengitterbelägen mit einer Liegezeit von über zehn Jahren mit rd. 200 l/(s·ha) allerdings auf deutlich niedrigerem Niveau.

Ebenso bestätigt sich auch für die stärker durchlässigen Pflasterbauweisen der signifikante Einfluss der Verkehrsbelastung durch Kraftfahrzeuge auf das Versickerungsvermögen. Bei allen betrachteten Belagstypen ergeben sich im Mittel für Standorte mit stärkerer oder häufigerer Inanspruchnahme durch Fahrzeuge geringere Versickerungsraten als bei geringerer bzw. seltenerer Beanspruchung.

Kein ganz einheitliches Bild ergibt sich aus der Analyse des Einflusses unterschiedlich lang andauernder Trockenperioden vor Versuchsbeginn auf das Versickerungsvermögen. Zudem ist aufgrund der vergleichsweise geringen

¹³⁹ Pflaster mit breiten sandgefüllten Fugen; Sickerpflaster mit splittgefüllten Fugen oder Kammern; Pflaster aus Porenbetonsteinen

Anzahl an Datensätzen, die Informationen zum Witterungsverlauf vor der Versuchsdurchführung enthalten, eine stunden- oder tageweise Differenzierung der Messdaten leider nicht möglich. Angesichts der generell hohen Variabilität der Versickerungsleistungen ist die Aussagekraft der Datenbasis in Bezug auf den witterungsbedingten Einfluss sicherlich begrenzt.

Dennoch sind bei relativ kurzen Trockenperioden von weniger als einem Tag vielfach geringere Versickerungsleistungen zu beobachten als bei länger anhaltenden Trockenperioden von einem oder mehreren Tagen. Mit anhaltender Trockenperiode nimmt das Versickerungsvermögen tendenziell zu, wenn auch z.T. nur recht geringfügig. Bei stärker durchlässigen Belagsarten scheint der Feuchtezustand im Oberbau einen insgesamt größeren Einfluss auf die Versickerungsleistung zu haben als bei gering bis mäßig durchlässigen Belagsarten. Zuden ist hier ein deutlicherer Anstieg des Versickerungsvermögens bei Trockendauern von über 1-2 Tage hinaus erkennbar.

In Abbildung 46 sind die Minima, Maxima und Medianwerte für fugenarmes Normalpflaster sowie für fugenarmes Porenbetonpflaster bei Trockenperioden von unter einem Tag den jeweiligen Werten bei länger anhaltenden Trockenperioden gegenüber gestellt.



Abbildung 46: Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen bei unterschiedlich langer Trockenperiode vor Versuchsbeginn am Beispiel von fugenarmem Normalpflaster und fugenarmem Porenbetonpflaster

Neben den vorgenannten baulichen, standortspezifischen oder klimatischen Randbedingungen wurden im Rahmen der statistischen Analyse noch einige weitere potenzielle Einflussfaktoren wie bspw. das Ausmaß der Vermoosung oder die Körnungsstrukturen der verwendeten Straßenbaumaterialien untersucht. Dabei konnte insgesamt keine eindeutige und bezifferbare Beeinträchtigung des Versickerungsvermögens gefunden werden.

Darüber hinaus zeigte sich, dass der augenscheinliche Zustand der Fläche und insbesondere der augenscheinliche Verschmutzungs- oder Kolmationsgrad der

versickerungsfähigen Fugen, Kammern oder Steine keinen direkten Rückschluss auf das tatsächlich vorhandene Versickerungsvermögen zulässt. Stark verschmutzt bzw. kolmatiert erscheinende Beläge weisen zwar vielfach vergleichsweise geringe Versickerungsleistungen auf. Trotzdem sind an diesen Belägen häufig auch sehr hohe Infiltrationsraten anzutreffen. Umgekehrt bestätigt sich der äußere Eindruck einer gering kolmatierten Fläche nur zum Teil in entsprechend hohen Versickerungsleistungen; erheblich reduzierte Versickerungsleistungen sind hier ebenso zu beobachten. Der tatsächlich bei einer bestimmten Fläche vorliegende Kolmationsgrad ist ohne Messung der Versickerungsrate nicht zweifelsfrei feststellbar und auch dann sein Einfluss auf das Versickerungsvermögen nur schwerlich zu quantifizieren.

4.2.3 Fazit der statistischen Analyse

Auf der Basis mehrerer hundert Messdaten, die aus verschiedenen Einzeluntersuchungen zusammengetragen und überlagert wurden, konnten Häufigkeitsverteilungen der Versickerungsleistungen verschiedener Pflasterbauweisen generiert werden. Damit kann die Infiltrationskapazität erstmals mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit kombiniert und der ausgeprägte stochastische Charakter des Versickerungsvermögens, der sich in einer enormen Variabilität des Versickerungsmögens äußert, auch quantitativ in erster Näherung erfasst werden. Dies stellt eine wesentliche Erweiterung des Kenntnisstandes dar und bildet eine wertvolle Grundlage, um Kennwerte und Größenordnungen des Versickerungsvermögens für verschiedene Anwendungsfälle und Planungsaufgaben qualifiziert benennen zu können.

Die ausgeprägte Variabilität des Versickerungsvermögens äußert sich in einer gewaltigen Streubreite der gemessenen Infiltrationsraten. Für konventionelles Normalpflaster werden Versickerungsleistungen von bis zu 600 l/(s·ha) erreicht, wobei im Mittel um eine Zehnerpotenz niedrigere Infiltrationsraten von rd. 55 l/(s·ha) zu verzeichnen sind. Für stärker durchlässige Pflasterbauweisen wie Sickerfugen- oder Porenbetonpflaster sind Versickerungsleistungen von über 10.000 l/(s·ha) vorzufinden. Das mittlere Infiltrationsvermögen liegt jedoch auch hier um ca. eine Zehnerpotenz niedriger bei rd. 900 l/(s·ha).

Die ausgeprägte Variabilität des Versickerungsvermögens wird durch eine Vielzahl von örtlichen und baulichen Einflussfaktoren hervorgerufen. Die Anlagerung von Feinpartikeln in den oberen Schichten des mineralischen Fugenmaterials und ggf. der porösen Deckschicht (Kolmation), die sich im Laufe der Nutzungsdauer einer Pflasterfläche vollzieht, bestimmt dabei in besonderem Maße die Versickerungsleistung. Der Kolmationsgrad einer Pflasterfläche ist von außen nicht direkt erkennbar und nur durch aufwändige Feldmessungen und Analysen des Fugenmaterials überhaupt quantifizierbar. Er spiegelt sich jedoch – in der Überlagerung mit anderen Einflussfaktoren – im jeweiligen Versickerungsvermögen einer Pflasterfläche wider.

Neben der Ermittlung flächentypspezifischer Häufigkeitsverteilungen wurde die gesammelte Datenbasis im Hinblick auf den quantitativen Einfluss verschiedener baulicher und standortspezifischer Randbedingungen auf das Versickerungsvermögen analysiert. Für einige standortspezifische Randbedingungen wie bspw. die Liegezeit und die verkehrliche Belastung einer Pflasterfläche konnte eine signifikante Beeinträchtigung der Versickerungsleistung in der Tendenz bestätigt und die jeweilige Tendenz für den Belagstyp des fugenarmen Normalpflasters auch mit Zahlenwerten untermauert werden. So liegt bei einer stark durch Kraftfahrzeuge in Anspruch genommenen Fläche aus konventionellem Rechteck- oder Verbundpflaster das Versickerungsvermögen im Vergleich zu einer gering beanspruchten Fläche um rd. 30% niedriger. Bei Liegezeiten von über fünf Jahren ergeben sich für diesen Belagstyp im Vergleich zu Liegezeiten unter fünf Jahren um rd. 25% geringere Versickerungsleistungen. Beide Einflüsse können sich dabei durchaus addieren.

Der signifikante Zusammenhang zwischen der Versickerungskapazität und verschiedenen flächenspezifischen Randbedingungen lässt allerdings keinen unmittelbaren Rückschluss auf die tatsächliche Versickerungsleistung einer Pflasterfläche zu. Auch besonders intensiv genutzte und/oder sehr alte Flächen können ausgesprochen hohe Versickerungsleistungen aufweisen, was die Ergebnisse und Erkenntnisse aus Kapitel 4.1 bestätigt. Die baulichen¹⁴⁰ und standortspezifischen¹⁴¹ Charakteristika einer Pflasterfläche können daher nicht als jeweils alleiniges Kriterium dienen, aus dessen Kenntnis sich das tatsächliche Versickerungsvermögen ableiten lässt.

¹⁴⁰ z.B. Fugenanteil, eingesetzte Materialien oder bauliche Durchbildung

¹⁴¹ überwiegende Nutzung, Verkehrsaufkommen, Liegezeit oder Flächenreinigung

4.3 Analyse externer Abflussmessdaten an Bestandsflächen

Die in den Kapiteln 4.1 und 4.2 geschilderten Analysen beziehen sich ausschließlich auf Messdaten zum Versickerungsvermögen, die im Rahmen von Infiltrometerversuchen erhoben wurden. Der Versuchsaufbau liefert durch den geringfügigen Überstau der Untersuchungsfläche und die damit erzwungene Infiltration Messwerte zum lokalen Versickerungsvermögen sowie seinem zeitlichen Verlauf. Da die Versickerungsleistung auch kleinräumig in einem erheblichen Wertebereich schwanken kann, sind die Messwerte nicht ohne Weiteres auf den gesamten Flächenstandort übertragbar. Darüber hinaus kann versuchsbedingt der Einfluss des Oberflächengefälles ebenso wenig berücksichtigt werden wie der oberflächige Abflussvorgang während eines Regenereignisses mit variabler Regenintensität.

Mit den Messdaten, die auf dem in Kapitel 3.4 beschriebenen Versuchsfeld in Lingen (Ems) von der Fachhochschule Osnabrück erhoben wurden, wird die Datenbasis zur Untersuchung des Versickerungsverhaltens enorm erweitert. Die Messungen liefern Abflussdaten aus natürlicher sowie künstlicher Beregnung für verschiedene Pflasterbauweisen unter realen Nutzungsbedingungen und für vergleichsweise große Flächensegmente von jeweils rd. 42 m².

Die Analyse der Messergebnisse zielt in erster Linie darauf ab, den Einfluss verschiedener Niederschlagscharakteristika wie die Regenintensität, die Regenhöhe oder die Trockenperiode vor Regenbeginn auf das Versickerungsvermögen im Gebrauchszustand näher zu untersuchen und zu quantifizieren. Darüber hinaus wurde analysiert, inwiefern das Versickerungsvermögen von verschiedenen baulichen Gegebenheiten beeinträchtigt wird. Die Ergebnisse der Niederschlags- und Abflussmessungen werden hierbei mit den Ergebnissen der Infiltrometermessungen abgeglichen. Auf diese Weise werden die aus den Infiltrometermessungen gewonnen Erkenntnisse abgesichert und ausgeweitet.

4.3.1 Einfluss der Niederschlagcharakteristik auf das Versickerungsvermögen

Die aus den Messung der Oberflächenabflüsse bei natürlichen Regenereignissen ermittelten Spitzenabflussbeiwerte¹⁴² sind in Abbildung 47 nach der Regenhöhe (links) und nach der maximalen Regenintensität (rechts) aufgetragen. Die Diagramme zeigen die Spitzenabflussbeiwerte für die Testflächen aus fugenreichem Rechteckpflaster (Belag B4, Fugenweite 10 mm), aus Sickerfugensteinen

 $[\]psi_s = q_{max}/r_{max}$; Messwerte aus 18 von der FH Osnabrück beprobten Regenereignissen

mit speziellen Ableitungsschlitzen (Belag B6, DrainSTON), aus fugenarm verlegten Rechteckpflaster (Testfeld F10, Fugenweite 4 mm) sowie zum Vergleich die Werte für die Testfelder mit Asphalt- und Sanddecke (Felder F09, F11, F12). Flächenpaare, die sich lediglich durch das Oberflächengefälle unterscheiden, sind in der Abbildung entsprechend gekennzeichnet (dunkler bzw. heller Farbton bei 2,5% bzw. 1,0% Gefälle).



Abbildung 47: Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenhöhe und der maximalen Regenintensität bei natürlichen Niederschlagsereignissen

Eine unmittelbare Korrelation des Spitzenabflussbeiwertes mit der Niederschlagshöhe ist für keinen der betrachteten Belagstypen ersichtlich. Zwar resultieren für Regenereignisse mit größeren Niederschlagshöhen vielfach höhere Spitzenabflussbeiwerte als bei geringeren Niederschlagshöhen; insgesamt überwiegt jedoch die Streuung der Werte, wobei die Streubreite mit zunehmender Regenhöhe anwächst.

Die Spitzenabflussbeiwerte bewegen sich abgesehen von der Asphaltfläche auf recht geringem Niveau. Für Regenhöhen unter 40 mm ergeben sich fast ausschließlich Abflussbeiwerte von unter 0,20. Die geringen Werte drücken dabei das beachtliche Rückhaltevermögen der Pflasterflächen aus. Lediglich bei zwei Ereignissen großer Regenfülle und -intensität ergeben sich höhere Spitzenabflussbeiwerte von bis zu 0,75. Zu diesem Ergebnis kam bereits Timmermann¹⁴³ bei ihrer Datenanalyse (vgl. Kapitel 2.4, Seite 85).

Ein etwas klarerer Zusammenhang zeichnet sich zwischen dem Spitzenabflussbeiwert und der maximalen Regenintensität je Ereignis ab (Diagramme rechts in Abbildung 47). Für die einzelnen Testfelder steigt der Spitzenabflussbeiwert mit zunehmender Regenintensität tendenziell an, wobei auch hier die Streubreite mit steigender Regenintensität erheblich zunimmt.

Da der Spitzenabflussbeiwert definitionsgemäß stark von der zu Grunde gelegten Regenspende abhängt, geben die Werte keinen unmittelbaren Aufschluss über den Zusammenhang zwischen dem Versickerungsvermögen und der Regenintensität. Daher werden nachfolgend die aus den Spitzenabflussbeiwerten¹⁴⁴ errechneten Infiltrationsraten (bzw. Retentionsraten) nach der Regenbelastung aufgetragen.

Die Diagramme in Abbildung 48 belegen, dass bei nahezu allen Testfeldern und Belagstypen Regenintensitäten von bis zu 80 l/(s·ha) quasi vollständig auf den Pflasterflächen zurück gehalten werden. Entsprechend steigt die Verlustrate (≈ Versickerungsrate) linear mit der Regenintensität an. Höhere Regenintensitäten von bis zu 225 l/(s·ha), bei denen das Versickerungsvermögen der Testfelder ausgeschöpft wurde, traten nur während zwei Ereignissen des Untersuchungszeitraumes von 1995 bis 1998 auf. Die Versickerungsleistungen liegen bei diesen Niederschlagsbelastungen überwiegend nochmals deutlich höher als bei geringeren Regenspenden. Gleichzeitig nimmt die Streubreite der Versickerungsleistung zwischen den Testfeldern zu. Dennoch deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Versickerungsleistung mit zunehmender Regenspende anwächst, unabhängig davon, ob bereits ein Oberflächenabfluss eingesetzt hat oder nicht.

¹⁴³ Timmermann, U. (1998)

¹⁴⁴ Die Spitzenabflussbeiwerte beziehen sich auf das oberirdische Abflussgeschehen und beinhalten keinen Drainageabfluss.



Abbildung 48: Infiltrationsrate in Abhängigkeit von der maximalen Regenintensität und der Regenhöhe bei natürlichen Niederschlagsereignissen

So erreicht bspw. der konventionelle Belag aus Rechteckpflaster mit schmalen Fugen von lediglich 4 mm (Testfeld F10) bei einer Regenspende von rd. 225 l/(s·ha) eine Versickerungsleistung von deutlich über 100 l/(s·ha), obwohl bei Regenintensitäten kleiner als 80 l/(s·ha) z.T. bereits Oberflächenabflüsse verzeichnet wurden.

Die auffällig geringen und stark variierenden Versickerungsleistungen für das Regenereignis mit einer Intensitätsspitze von rd. 160 l/(s·ha) sind vermutlich darauf zurück zu führen, dass diesem Ereignis nur eine vergleichsweise kurze Trockenperiode voraus ging. Die starke Streuung der Versickerungsleistungen mit z.T. ausgesprochen niedrigen Werten zeigt sich bei allen Belagstypen, so dass ein Messfehler unwahrscheinlich ist.

Die zum Vergleich dargestellten Verlustraten der Asphaltfläche bewegen sich je nach Niederschlagsbelastung zwischen 5 l/(s·ha) und 25 l/(s·ha) und repräsentieren damit näherungsweise und der Größenordnung nach den Anteil am Gesamtrückhalt der Testfelder, der nicht auf die Versickerung entfällt.

In der Grafik unten rechts in Abbildung 48 sind zudem exemplarisch die Verlustraten für den Belagstyp B6 in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe aufgetragen. Die Grafik bestätigt, dass zwischen der Versickerungsleistung und der Niederschlagshöhe – wie bereits beim Spitzenabflussbeiwert – kein unmittelbarer Zusammenhang besteht. Für die übrigen Belagstypen bzw. Testfelder ergeben sich ganz ähnliche Darstellungen, die auszugsweise im Anhang enthalten sind.

Die Korrelation zwischen der Versickerungsleistung und der Niederschlagsintensität wird anhand der Grafiken in Abbildung 49 weiter analysiert. In den Diagrammen sind die Versickerungsleistungen ausgewählter Testfelder nach der momentanen Regenintensität¹⁴⁵ aufgetragen. Dabei sind die Messwerte aus der künstlichen Flächenberegnung¹⁴⁶ den Werten aus natürlichen Regenereignissen einander gegenübergestellt.

Der ausgeprägte Einfluss der momentanen Niederschlagsintensität auf die Versickerungsleistung von Pflasterbauweisen wird in den Darstellungen besonders deutlich. Nach Überschreiten des Versickerungsvermögens steigt die Infiltrationsrate weiter an.¹⁴⁷ Dieses Phänomen zeigt sich unabhängig vom Deckbelag bei allen betrachteten Pflasterflächen des Versuchsfeldes, ist aber in der Literatur bislang nicht genannt. Bislang ging man vielmehr von einem festen Schwellenwert aus, bei dessen Überschreiten ein entsprechender Oberflächenabfluss resultiert¹⁴⁸.

¹⁴⁵ Anders als in Abbildung 48 sind hier sämtliche Regenintensitäten innerhalb eines einzelnen Ereignisses mit den zugehörigen Versickerungsraten dargestellt. Abbildung 48 zeigt dagegen die maximalen Regenspenden verschiedener Regenereignisse sowie die zugehörigen Verlustraten.

¹⁴⁶ Messwerte nach 20-minütiger Beregnung mit konstanter Intensität; jeweils 3-4 Versuche je Beregnungsintensität

¹⁴⁷ Die z.T. großen Streubreiten sind auf das generell höhere Infiltrationsvermögen zu Ereignisbeginn zurück zu führen.

¹⁴⁸ Diese Annahme wird bspw. im hydrologischen Berechnungsansatz nach Horton umgesetzt.



Abbildung 49: Versickerungsraten in Abhängigkeit von der Regenspende bei natürlicher und künstlicher Beregnung (ausgewählte Testfelder, Lingen)

Die Annahme eines Schwellenwertes kann anhand der vorliegenden Messwerte nicht bestätigt werden. Sowohl bei der künstlichen Beregnung als auch bei natürlichen Regenereignissen nimmt das Versickerungsvermögen auch nach Einsetzen eines Oberflächenabflusses kontinuierlich mit der Regenspende zu.

So steigt bei dem Testfeld des konventionellen Funktionspflasters aus fugenarm verlegten Betonsteinen (Fläche F10) die Versickerungsrate von 80 l/(s·ha) bei einer Niederschlagsintensität von 100 l/(s·ha) auf 150 l/(s·ha) bei einer Intensität von 300 l/(s·ha) an. Für die dargestellten Beläge aus Sickerfugenpflaster (Flächen F31 und F32) ergeben sich mit Werten von rd. 130 l/(s·ha) und rd. 160 l/(s·ha) bei einer Regenspende von 300 l/(s·ha) ebenfalls deutlich höhere Versickerungsleistungen als bei geringeren Regenintensitäten. Für die übrigen Pflasterflächen ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Versickerungsleistungen bei künstlicher Beregnung der Versuchsfelder fügen sich dabei gut in die Werte aus der Beprobung der natürlichen Niederschlagsereignisse ein, die eine insgesamt größere Streuung aufweisen.

Bei natürlichen Böden ist eine derart ausgeprägte Zunahme der Versickerungsleistung mit der Niederschlagsintensität nicht zu beobachten.¹⁴⁹ Höhere Regenintensitäten führen dort in der Regel nur dazu, dass die anfänglich hohen Infiltrationsraten rascher zurück gehen und sich einem Endwert annähern. Dies unterstreicht die zuvor geäußerte Einschätzung, dass sich das Versickerungsverhalten von Pflasterflächen erheblich vom Versickerungsverhalten natürlicher Böden unterscheidet.

Wodurch dieses Phänomen hervorgerufen wird ist anhand der vorliegenden Messwerte allein nicht erklärbar. Es wird hier zunächst nur das grundsätzliche Phänomen dokumentiert und beschrieben. Ein Erklärungsansatz möglicher Ursachen des Phänomens wird nachfolgend anhand der Ergebnisse der Laborversuche sowie der numerischen Simulationen genannt.

Im Vergleich zu den Messwerten der Infiltrometerversuche, die auf einzelnen Testfeldern der Versuchsanlage durchgeführt wurden¹⁵⁰, liefern die Abflussmessungen etwas geringere Versickerungsleistungen. Allerdings ist der direkte Vergleich der punktuell erhobenen Messdaten aus den Infiltrometerversuchen mit den Ergebnissen der Abflussmessungen an den Gesamtflächen der Testfelder nicht möglich. Zudem liegen zwischen den Abflussmessungen und den Infiltrometerversuche mehrere Jahre, in denen sich der Zustand der Testflächen verändert haben kann.

¹⁴⁹ vergleiche hierzu auch Abbildung A - 55 im Anhang

¹⁵⁰ vgl. Kapitel 4.1.1 und Abbildung 25

Die für hohe Regenintensitäten aus den gemessenen Abflussspitzen ermittelten Versickerungs- bzw. Verlustraten liegen überwiegend zwischen den Versickerungsleistungen, die an Messpunkten mit besonders hoher und an Messpunkten mit besonders geringer Beanspruchung durch Kraftfahrzeuge mit Hilfe des Tropfinfiltrometers erfasst wurden. Zwar besteht bei Infiltrometermessungen aufgrund des Überstaus der Testfläche die Gefahr der Überschätzung der Versickerungsleistung, der Vergleich mit den Abflussmessungen bestätigt jedoch die Plausibilität und die Aussagekraft der Messmethode.

Die Vorbefeuchtung des Pflasteraufbaues durch voran gegangene Niederschlagsereignisse wird immer wieder als Kriterium für dessen momentane Versickerungskapazität angeführt. Bereits Schramm und Münchow¹⁵¹ sowie Nolting¹⁵² berichten von reduzierten Versickerungsleistungen bei unmittelbar vor Versuchsbeginn genässten Flächen. Ein Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Vorbefeuchtung und dem Versickerungsvermögen könnte im Zuge der Auswertung der Versickerungsversuche in den Kapiteln 4.1 und 4.2 zwar bestätigt, eine strenge Korrelation jedoch nicht nachgewiesen werden. Die Messdaten der Versuchsanlage in Lingen wurden daher ebenfalls auf eine Korrelation zwischen der Versickerungsleistung und dem Vorbefeuchtungsgrad hin untersucht. Die Länge einer Trockenperiode wird hierbei vereinfachend als Maß für den Grad der Vorbefeuchtung verwendet.

In Abbildung 50 sind die Versickerungsraten verschiedener Testfelder nach der Trockenperiode vor Regenbeginn aufgetragen. Die linke Grafik zeigt die Infiltrationsleistungen der Testfläche F10 aus fugenarmem Normalpflaster bei natürlicher Beregnung (18 Ereignisse), lässt aber zunächst keinen Einfluss der Trockenperiode auf die Versickerungsleistung erkennen. Die Retentionsraten schwanken zwischen 5 l/(s·ha) und 115 l/(s·ha), wobei den einzelnen Werten ganz unterschiedliche Regenintensitäten zu Grunde liegen.

Die geringen Versickerungsraten unter 40 l/(s·ha) ergeben sich in erster Linie aus den vergleichsweise schwachen Regenintensitäten, bei denen das Versickerungsvermögen des Pflasterbelages nicht ausgeschöpft und der Niederschlag nahezu vollständig zurück gehalten wird. Für Regenereignisse höherer Intensitäten ergeben sich bei kurzen Trockenperioden vor Regenbeginn dagegen tendenziell geringere Versickerungsraten als bei längeren Trockenperioden. Für das Ereignis R08 mit einer recht kurzen Trockenperiode von lediglich zwei Stunden ergibt sich beispielsweise mit rd. 57 l/(s·ha) angesichts der hohen Regenintensität von maximal 160 l/(s·ha) eine relativ geringe Versickerungsleistung. Ebenso fällt für

¹⁵¹ Schramm, M. und Münchow, B. (1995)

¹⁵² Nolting, B. et al. (2005)

das Regenereignis R04 nach einer Trockenperiode von drei Stunden und einer maximalen Regenspende von 46 l/(s·ha) die Infiltrationsrate mit rd. 37 l/(s·ha) etwas geringer aus als bei Regenereignissen ähnlicher Spitzenintensitäten aber längeren Trockenzeiten.



Abbildung 50: Versickerungsraten in Abhängigkeit von der Trockenperiode vor Regenbeginn (Versuchsfeld, Lingen)

In der rechten Grafik in Abbildung 50 sind die Versickerungsleistungen weiterer Testfelder für Regenintensitäten gleicher Größenordnung einander gegenüber gestellt. Die Versickerungsraten nehmen im Wesentlichen Werte zwischen 40 l/(s·ha) und 50 l/(s·ha) ein. Die geringfügigen Schwankungen ergeben sich dabei in erster Linie aus den unterschiedlichen Regenintensitäten und sind nicht auf die unterschiedlich langen Trockenperioden zurück zu führen. Für das betrachtete Intensitätsspektrum von 43-50 l/(s·ha) ist bei den stärker durchlässigen Belagstypen kein nennenswerter Einfluss des Vorbefeuchtungsgrades zu verzeichnen.

Für höhere Regenintensitäten, bei denen das Versickerungsvermögen zunehmend ausgeschöpft wird, liegen dagegen nur Ergebnisse von zwei Regenereignissen vor (vgl. Abbildung 48). Dabei war nach einer sehr kurzen Trockenperiode von unter drei Stunden an allen Testfeldern ein deutlich geringeres Versickerungsvermögen zu beobachten als nach einer Trockenperiode von über vier Tagen.

Damit bestätigt sich zwar insgesamt der generelle Einfluss der Vorbefeuchtung auf das Versickerungsvermögen einer Pflasterfläche; für eine umfassende und detaillierte Quantifizierung dieses Einflusses reicht der Datenumfang der Abflussmessungen jedoch nicht aus. Es kann lediglich festgestellt werden, dass bei Regenintensitäten von unter 50 l/(s·ha) bei allen Pflasterflächen die Vorbefeuchtung nur einen mäßigen Einfluss auf die Versickerungsleistung ausübt. In den ersten Stunden nach Ende des vorherigen Ereignisses ist das Versickerungsvermögen bei Regenereignissen dieses Intensitätsbereiches um maximal 20% reduziert. Je durchlässiger der Belag dabei ist, umso geringer ist dabei der Einfluss der Vorbefeuchtung. Bei Regenereignissen höherer Intensitäten von über 150 l/(s·ha) macht sich eine Vornässung der Pflasterfläche in stärkerem Maße bemerkbar. Hier ist bei sehr kurzen Trockenperioden das Versickerungsvermögen um bis zu 90% herabgesetzt.

4.3.2 Einfluss baulicher Gegebenheiten auf das Versickerungsvermögen

Das Versuchsfeld in Lingen ist so konzipiert, dass sich einzelne Versuchsflächen lediglich durch eine einzige bauliche Randbedingung unterscheiden. Die Gegenüberstellung der Messdaten entsprechender Flächenpaare erlaubt daher die vergleichende Bewertung des Einflusses der jeweiligen Randbedingungen auf das Versickerungsvermögen¹⁵³.

16 Flächenpaare des Testfeldes unterscheiden sich in ihrem Aufbau nur durch das Oberflächengefälle, das bei der einen Hälfte 2,5%, bei der anderen Hälfte 1,0% beträgt. Die aus den gemessenen Abflussspitzen ermittelten Versickerungsraten dieser Flächenpaare nach 20-minütiger Beregnung sind als belagsweise Mittelwerte¹⁵⁴ in Abbildung 51 einander gegenüber gestellt. Neben den ermittelten Versickerungsraten zeigt die Abbildung auch die mittleren prozentualen Abweichungen infolge des Gefälleunterschiedes je Belagstyp und Beregnungsintensität.

Für die Belagstypen B5, B6 und B7¹⁵⁵ ergeben sich für das geringere Oberflächengefälle von 1,0% erwartungsgemäß überwiegend größere Versickerungsraten. Dabei nehmen die prozentualen Abweichungen mit steigender Regenintensität zu. Für Regenspenden bis zu 100 l/(s·ha) liegen die Abweichungen überwiegend unter 10%. Für höhere Regenintensitäten ergeben sich gegenüber einem Gefälle von 2,5% im Mittel um bis 35% erhöhte Versickerungsleistungen. Je nach betrachtetem Flächenpaar treten hierbei mehr oder weniger ausgeprägte Abweichungen auf.

¹⁵³ siehe auch Kapitel 3.4

 $^{^{154}}$ arithmetischer Mittelwert der Versickerungsrate f_{20} aller Testfelder eines Belagstyps je betrachteter Beregnungsintensität; für jede Beregnungsintensität wurden 3-4 Beregnungsversuche durchgeführt

 ¹⁵⁵ B5: Rechteckpflaster mit breiten splittgefüllten Fugen (Fugenbreite 30 mm)
B6: Sickerfugenpflaster mit speziellen Ableitungsschlitzen an den Steinwandungen
B7: fugenarmes Porenbetonpflaster (Fugenbreite 4 mm)



Abbildung 51: Gegenüberstellung des Versickerungsvermögens verschiedener Pflasterbauweisen bei 2,5% und 1,0% Gefälle nach 20-minütiger Beregnung¹⁵⁶

Bei einzelnen Flächenpaaren und/oder Beregnungsintensitäten weisen dagegen die Flächen stärkeren Gefälles die höheren Versickerungsleistungen auf. Insbesondere für den Belag B4¹⁵⁷ halten sich erhöhte und reduzierte Infiltrationsraten die Waage und führen bei den meisten Beregnungsintensitäten im Mittel zu sehr geringen prozentualen Differenzen. Die unerwarteten Ergebnisse werden in erster Linie auf die kleinräumige Variabilität des Versickerungsvermögens zurück

¹⁵⁶ In der oberen Grafik gibt die erste Säule jeweils den Wert bei 2,5% Gefälle an; die zweite Säule den Wert bei 1,0% Gefälle.

¹⁵⁷ B4: Rechteckpflaster mit breiten splittgefüllten Fugen (Fugenbreite 10 mm)

geführt und unterstreichen nochmals den stochastischen Charakter des Versickerungsverhaltes von Pflasterflächen.

Die Variabilität in den prozentualen Differenzen der Versickerungsleistungen ist in Abbildung 52 dargestellt. Die Abbildung zeigt die je Flächenpaar und Beregnungsintensität an den Belagstypen B4-B7 aufgetretenen prozentualen Abweichungen der Versickerungsrate nach 20-minütiger Beregnung. Die Diagramme verdeutlichen zum einen den klaren Trend der erhöhten Versickerungsleistungen bei geringerem Gefälle für die Belagstypen B5-B7. Zum anderen dokumentieren sie die bei den einzelnen Flächenpaaren zu verzeichnenden Abweichungen, die im Vergleich zu den belagsweise gemittelten Werten mit bis zu 75% nochmals deutlich höher ausfallen können und insgesamt eine durchaus hohe Variabilität aufweisen. Eine noch detailliertere Gegenüberstellung der an den einzelnen Flächenpaaren unterschiedlichen Gefälles beobachteten Abweichungen ist im Anhang enthalten.¹⁵⁸



Abbildung 52: Mittlere prozentuale Abweichungen der Versickerungsrate je Flächenpaar und Beregnungsintensität zwischen Gefällen von 1,0% und 2,5%

¹⁵⁸ siehe Abbildung A - 25 und Abbildung A - 26

Insgesamt belegt die Gegenüberstellung der Versickerungskennwerte eindeutig, dass auch das Oberflächengefälle das Versickerungsvermögen einer Pflasterfläche beeinflusst. Dabei ist prinzipiell auch bei stark durchlässigen Flächenbelägen wie Sickerfugen- oder Porenbetonpflaster ein mit steigendem Gefälle abnehmendes Versickerungsvermögen zu erwarten. Im Vergleich der relativ geringen Gefälledifferenz zwischen 1,0% und 2,5% ergibt sich für die betrachteten Belagstypen überwiegend ein um 5%-20% differierendes Versickerungsvermögen. Da Abweichungen von über 25% eher die Ausnahme bilden, wird trotz der vereinzelt sehr ausgeprägten Differenzen der Einfluss des Oberflächengefälles als insgesamt moderat bezeichnet. Gleichwohl ist für steiler verlegte ebenso wie für geringer durchlässige Pflasterflächen mit einer entsprechend stärkeren Reduktion des Versickerungsvermögens zu rechnen. Dieser Aspekt wurde im Rahmen der Laborversuche eingehender untersucht und wird in Kapitel 4.4 erörtert.

Neben dem Oberflächengefälle als primäres bauliches Flächenmerkmal können weitere bauliche Randbedingungen das Versickerungsverhalten beeinträchtigen. Nachfolgend wird analysiert, in welchem Maße unterschiedliche Materialien für Fugen, Bettung und Tragschicht mit entsprechend differierender Körnungsstruktur das Versickerungsvermögen beeinträchtigen können.

In Abbildung 53 sind die prozentualen Abweichungen der Versickerungsrate nach 20-minütiger Beregnung für Flächenpaare des Belagstyps B6 dargestellt, die sich nur durch das Fugenmaterial baulich unterscheiden. Bei der einen Hälfte der Flächen wurde ein gewaschener Sand (Körnung 0/5 mm), bei der anderen ein Gemisch aus Sand (0/5 mm) und Splitt (1/4 mm) zur Verfüllung der Fugen verwendet. ¹⁵⁹ Das grobkörnigere Sand-Splitt-Gemisch weist eine höhere hydraulische Leitfähigkeit auf, die sich in z.T. deutlich erhöhten Versickerungsleistungen an den Vergleichsflächen nieder schlägt. Im Mittel der vier Flächenpaare ergeben sich je nach Beregnungsintensität Abweichungen zwischen 5% und 35% bei Intensitäten von 70 l/(s· ha) bzw. 300 l/(s·ha). Bei einzelnen Flächenpaaren sind dabei auch Abweichungen von über 100% zu beobachten.

¹⁵⁹ Fugenmaterial der Testfelder F1, F2, F5 und F6: gewaschener Sand mit Körnung 0/5 mm Fugenmaterial der Testfelder F3, F4, F7 und F8: Gemisch aus Sand (0/5 mm) und Splitt (1/4 mm)



Abbildung 53: Prozentuale Abweichung der Versickerungsrate für Vergleichsflächen aus Sickerfugenpflaster bei unterschiedlichem Fugenmaterial

Zur Bewertung des Einflusses unterschiedlicher Materialien für die Pflasterbettung auf das Versickerungsvermögen steht nur ein Flächenpaar der Versuchsanlage zur Verfügung. Lediglich die beiden Flächen F33 und F37 weisen verschiedene Mineralstoffgemische für die Bettung als einzigen baulichen Unterschied auf. Bei der Fläche F33 kam ein Splitt der Körnung 2/5 mm zur Anwendung, während für das Testfeld F37 ein Grubensand der Körnung 0/1 mm als Bettungsmaterial verwendet wurde. Die Pflasterung besteht aus rechteckigen Betonsteinen mit 10 mm breiten Fugen, die mit Splitt der Körnung 2/5 mm verfüllt sind. Die rechnerischen Versickerungsraten nach 20-minütiger Beregnung der beiden Testfelder sind in Abbildung 54 einander gegenüber gestellt.

Zwar kann mit nur einem Flächenpaar als Bewertungsgrundlage keine allgemeingültige Aussage getroffen, dennoch bestätigt die Gegenüberstellung, dass auch die Körnungsstruktur und damit die hydraulische Leistfähigkeit des Bettungsmaterials durchaus einen Einfluss auf das Versickerungsvermögen eines Pflasteraufbaus haben können. Im vorliegenden Beispiel weist der Sickerfugenbelag auf einer Bettung aus Splitt bei allen betrachteten Beregnungsintensitäten höhere Versickerungsleistungen auf. Die Differenzen betragen je nach Beregnungsintensität 3%-65%.



Abbildung 54: Gegenüberstellung der Versickerungsraten für Vergleichsflächen aus Sickerfugenpflaster bei unterschiedlichem Bettungsmaterial

Ein Vergleich der Versickerungsleistungen bei unterschiedlichen Mineralstoffgemischen für die Tragschicht ist für je vier Versuchsfelder der Belagstypen B4¹⁶⁰ und B7¹⁶¹ möglich. Als Tragschichtmaterialen kamen ein Brechkorngemisch der Körnung 0/45 mm sowie ein Recyclingmaterial der Körnung 0/32 mm aus Beton-Aufbruch zur Anwendung. Die belagsweise gemittelten prozentualen Differenzen der Versickerungsrate nach 20-minütiger Beregnung zwischen dem Recyclingmaterial und dem Brechkorngemisch sind in Abbildung 55 dargestellt. Die je Flächenpaar beobachteten Differenzen sind im Anhang dargestellt.





¹⁶⁰ Belagstyp B4: Sickerfugenpflaster mit 10 mm breiten splittgefüllten Fugen

¹⁶¹ Belagstyp B7: fugenarmes Porenbetonpflaster

Für das Recyclingmaterial sind überwiegend höhere Versickerungsleistungen zu verzeichnen, wobei sich sowohl über die unterschiedlichen Flächenpaare als auch über die verschiedenen Regenintensitäten kein ganz einheitliches Bild ergibt. Für je drei der vier Flächenpaare beider Belagstypen liefern die Flächen auf Recyclingmaterial durchweg für alle Regenintensitäten höhere Versickerungsleistungen. Die prozentualen Differenzen variieren dabei zwischen den Beregnungsintensitäten mitunter ganz erheblich. Bei einigen Flächenpaaren sind Differenzen von bis zu 100% bei einzelnen Beregnungsintensitäten zu verzeichnen. Im Mittel je Belagstyp liegen die prozentualen Abweichungen überwiegend in der Größenordnung von 20%-40%. Die Differenzen sind damit deutlich höher als erwartet.

Da weder die hydraulischen Leitfähigkeiten noch sonstige Eigenschaften der beiden verwendeten Tragschichtmaterialien bekannt sind, können die Ursachen für das unterschiedliche Versickerungsvermögen nicht beurteilt werden. Dennoch repräsentieren die beprobten Flächenpaare Testfelder, die sich baulich nur durch die Tragschicht unterscheiden. Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen lassen daher die Schlussfolgerung zu, dass auch die Tragschicht einen Einfluss auf das Versickerungsvermögen der Gesamtkonstruktion haben kann. Dieser muss allerdings nicht zwingend durch die bodenhydraulischen Eigenschaften der Tragschichtmaterialen bedingt sein, sondern kann letztlich auch in bodenmechanischen Materialeigenschaften wie bspw. Verdichtbarkeit oder Filterstabilität begründet liegen. Eine derart starke Beeinträchtigung des Versickerungsvermögens durch die Tragschicht, wie es die Messergebnisse vermuten ließen, erscheint nur schwer vorstellbar. Hier wären sicherlich weitere messtechnische Erhebungen an entsprechenden Vergleichsflächen wünschenswert.

Eine hinsichtlich ihrer Auswirkung auf das Versickerungsvermögen vielfach kontrovers diskutierte Randbedingung ist die Durchlässigkeit des Planums bzw. des anstehenden Untergrundes. Hanses¹⁶² konnte beispielsweise zeigen, dass eine geringe Untergrunddurchlässigkeit nicht zwingend einen negativen Einfluss auf die Versickerungsleistung einer Pflasterfläche haben muss. Insgesamt liegen diesbezüglich allerdings erst sehr wenige Erfahrungswerte vor. Dies war einer der Gründe dafür, auf dem Versuchsfeld in Lingen für nahezu jeden Flächenaufbau eine Variante mit freier Perkolation und eine ansonsten baugleiche Variante mit abgedichtetem Planum zu errichten. Damit stehen zur Bewertung der Korrelation zwischen dem Versickerungsvermögen und der Planumsdurchlässigkeit ausgesprochen viele Flächenpaare zur Verfügung.

Die prozentualen Differenzen der Versickerungsraten zwischen den einzelnen Flächenpaaren sind separat für jeden Belagstyp in Abbildung 56 dargestellt.

¹⁶² Hanses, U. et al (1999)



Abbildung 56: Mittlere prozentuale Abweichungen der Versickerungsrate je Flächenpaar und Beregnungsintensität zwischen Testfeldern ohne und mit abgedichtetem Planum

Die prozentualen Abweichungen der Versickerungsrate nach 20-minütiger Beregnung bewegen sich bei den meisten Testfeldern in der Größenordnung von \pm 25%. Größere Abweichungen von bis zu 50% ergeben sich vorwiegend nur bei hohen Beregnungsintensitäten von 200-300 l/(s·ha). Dabei ist insgesamt keine klare Tendenz erkennbar.

Bei zahlreichen Flächenpaaren treten unabhängig von der Beregnungsintensität sowohl negative als auch positive Abweichungen auf. Bei einigen Flächenpaaren liefert stets die Bauvariante ohne Abdichtung des Planums bei allen Beregnungsintensitäten die höheren Versickerungsleistungen; bei anderen Flächenpaaren die Variante mit Abdichtung des Planums. Dabei überwiegen sogar die Flächenpaare, bei denen die Variante mit freiem Planum die geringeren Versickerungsleistungen aufweist. Auch der Vergleich der Abflussganglinien bei intensitätsstarken und volumenreichen Niederschlagsereignissen liefert hier kein anderes Bild.¹⁶³

¹⁶³ siehe Abbildung A - 29 im Anhang

Eine negative Beeinträchtigung des Versickerungsvermögens infolge eines quasi undurchlässigen Planums kann anhand der Messergebnisse auf dem Versuchfeld in Lingen nicht nachgewiesen werden. Die Durchlässigkeit des Planums bzw. des anstehenden Untergrundes scheint weder bei kurzzeitigen Starkregenereignissen noch bei lang anhaltenden Niederschlägen einen ausgeprägten Einfluss auf das Versickerungsvermögen zu haben. Die Variabilität in den Versickerungsleistungen der jeweiligen Testfelder wird in erster Linie auf die allgemein anzutreffende kleinräumige Variabilität des Versickerungsvermögens nach mehrjähriger Nutzung zurück geführt.

4.3.3 Fazit aus der Analyse der Abflussmessdaten an Bestandsflächen

Das Versuchsfeld in Lingen stellt eine weltweit einmalige Anlage zur Bewertung des Abfluss- und Versickerungsverhaltens von Pflasterflächen unter realen Nutzungsbedingungen dar. Wenngleich die Messdaten aufgrund der Datenerhebung an einem einzigen Standort nur eine eingeschränkte Repräsentativität aufweisen, besitzen sie aufgrund der realen bzw. äußerst realen Versuchsbedingungen sowie der qualitativ hochwertigen Messtechnik eine enorm hohe Aussagekraft, zumal im Rahmen der Datenanalyse vielfach der relative Vergleich einzelnen Testfelder im Vordergrund steht.

Im Rahmen der Datenanalyse konnte gezeigt werden, dass das Versickerungsvermögen in hohem Maße von der aktuellen Niederschlagsintensität abhängt. Mit zunehmender Regenintensität steigt die Versickerungsleistung auch dann erheblich an, wenn das Versickerungsvermögen zumindest auf Teilen der Pflasterfläche erschöpft ist und ein Oberflächenabfluss bereits eingesetzt hat.

Dieses Phänomen ist bislang in der Fachliteratur nicht dokumentiert und stellt eine völlig neue Erkenntnis dar. Ein fester, von der Niederschlagsintensität unabhängiger Schwellenwert der Versickerungsleistung, wie er bei natürlichen Böden zu finden ist, konnte an den untersuchten Pflasterflächen nicht beobachtet werden. Dies unterstreicht das von natürlichen Böden differierende Versickerungsverhalten von Pflasterbauweisen. Aus stadthydrologischer Sicht bedeutet das überdies, dass auch bei Regenereignissen, deren Intensität weit unter dem maximalen Versickerungsvermögen einer Pflasterflächen liegt, nennenswerte Oberflächenabflüsse entstehen können.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass auch die Vorbefeuchtung des Pflasteraufbaus durch vorangegangene Niederschläge das Versickerungsvermögen beeinträchtigt. Insbesondere bei kurzzeitigen Trockenperioden von wenigen Stunden und hohen Intensitäten des nachfolgenden Regenereignisses kann die Versickerungsleistung nennenswert herabgesetzt sein. Die Niederschlagshöhe eines Regenereignisses hat dagegen keinen unmittelbaren Einfluss auf das Versickerungsvermögen. Ein Rückgang der Versickerungsleistung mit fortdauerndem Niederschlag ist, abgesehen von der Abnahme der anfänglich hohen Versickerungsrate innerhalb der ersten 10-30 Minuten eines Ereignisses, nicht zu beobachten.

Neben belastungsspezifischen Randbedingungen wurden im Rahmen der Datenanalyse verschiedene bauliche Randbedingungen hinsichtlich ihres Einflusses auf das Versickerungsvermögen hin untersucht. Hierbei konnte gezeigt werden, dass sowohl das Oberflächengefälle als auch die verwendeten Materialien für Fugenfüllung und Pflasterbettung – wie erwartet – mitbestimmend über die Höhe der Versickerungsleistung sind. So resultieren für Pflasterflächen mit einem sehr geringen Gefälle von lediglich 1,0% im Vergleich zu einem Gefälle von 2,5% je nach Regenintensität im Mittel um 5%-35% erhöhte Versickerungsraten. Grobkörnigere Mineralstoffgemische bspw. aus Splitt führen zu höheren Versickerungsleistungen als feinkörnigere Materialen aus Sand.

Ein unerwartetes Ergebnis zeigte die Gegenüberstellung von Pflasterflächen mit unterschiedlichen Tragschichten aber ansonsten gleichem Aufbau. Bei zahlreichen Vergleichsflächen ergeben sich deutliche Differenzen im Versickerungsvermögen, die in der Größenordnung von 20%-40% liegen. Inwiefern diese Differenzen tatsächlich auf die bodenhydraulischen Eigenschaften der Tragschicht zurück zu führen sind, kann jedoch nicht aufgeklärt werden. Möglicherweise spielen weitere Aspekte eine Rolle.

Dagegen konnte gezeigt werden, dass eine sehr geringe Durchlässigkeit des anstehenden Untergrundes die Versickerungsleistung des Pflasteraufbaus nicht negativ beeinträchtigt. Aus der Gegenüberstellung baugleicher Flächenpaare mit und ohne Abdichtung des Planums ergeben sich weder für kurzzeitige Starkregen noch für lang anhaltende Niederschlagsereignisse Abweichungen im Versickerungsvermögen, die auf die Durchlässigkeit des Planums zurück geführt werden können.

Durch die Analyse der Messdaten können bereits beobachtete oder vermutete Sachverhalte bestätigt und auch zahlenmäßig untermauert werden. Darüber hinaus konnten neue und wertvolle Erkenntnisse gesammelt werden, die den Kenntnisstand zum Versickerungsphänomen auf Pflasterflächen nochmals deutlich erweitern.

4.4 Ergebnisse der Lysimeterversuche im Labor

Anhand von Beregnungsversuchen an der in Kapitel 3.5.1 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 ergänzen die Messungen an Bestandsflächen und umfassten verschiedene Pflaster- und Plattenbeläge mit ganz unterschiedlichem Versickerungsvermögen. Die wesentlichen Ergebnisse der Labormessreihe werden nachfolgend zusammengefasst.

4.4.1 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 (Abbildung 57). Den prinzipiellen Aufbau der im Lysimeter untersuchten Pflasterflächen zeigt Abbildung 58.



Abbildung 57: Flächenbeläge aus fugenarmem Doppelverbund- und Rechteckpflaster


Abbildung 58: Schemaskizze des Pflasteraufbaus

Bei den Beregnungsversuchen wurden jeweils der Oberflächenabfluss, der Sickerabfluss aus der Tragschicht sowie die volumetrischen Wassergehalte in der Tragschicht aufgezeichnet. Aus der Differenz zwischen der Beregnungsintensität und dem Oberflächenabfluss wurde die aktuelle Infiltrationsrate errechnet. Die je Messintervall registrierten bzw. ermittelten Abflusswerte wurden aufaddiert um Volumenbilanzen durchführen zu können.

In nachfolgender Abbildung 59 sind die aufgezeichneten Messwerte exemplarisch für einen Versuch an einem Doppelverbundpflaster mit einem Gefälle von 2,5% grafisch dargestellt. Die aufgetragene und eingespülte Quarzmehlmenge betrug hier 400 g/m² und entspricht einem ausgeprägten Kolmationsgrad¹⁶⁴. Die Beregnung erfolgte über einen Zeitraum von zwei Stunden mit einer konstanten Intensität von 100 l/(s·ha). Zum Vergleich sind in Abbildung 60 die analogen Messwerte für den gleichen Belag, jedoch für eine Beregnungsintensität von 200 l/(s·ha) und bei mäßigem Kolmationsgrad (200 g/m² Quarzmehl), dargestellt.

Die Abbildungen verdeutlichen, dass innerhalb von 1-3 Minuten nach Beginn der Beregnung Oberflächenabfluss einsetzt. In diesem Zeitraum gibt die errechnete Infiltrationsrate nicht das aktuelle Versickerungsvermögen bzw. die aktuelle Versickerungsrate an, sondern beschreibt die Anfangsverluste durch die Benetzung der Oberfläche (hier rd. 1,0 mm) sowie die Füllung von Grobporen im Fugen- und Bettungsmaterial. Im weiteren Verlauf wird die Höhe des Oberflächenabflusses in erster Linie von der momentanen Infiltrationsrate bestimmt, die im gezeigten Beispiel während der Versuchsdauer bei konstanter Beregnungsintensität sukzessive leicht abnimmt. Der Oberflächenabfluss steigt entsprechend an. Insgesamt wurden bei den Beregnungsversuchen im Labor jedoch sowohl

¹⁶⁴ vgl. Häufigkeitsverteilung in Abbildung 39



konstante als auch fortlaufend ansteigende oder abnehmende Infiltrationsraten beobachtet.

Abbildung 59: Messwertdarstellung für einen Beregnungsversuch an Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle (400 g/m² Quarzmehl, r = 100 l/(s·ha))

Nach einer Beregnungsdauer von rd. 30 Minuten setzt auch der Sickerabfluss aus der Tragschicht ein. Der Zeitpunkt hängt u.a. von der infiltrierten Wassermenge ab, die wiederum unmittelbar von der Durchlässigkeit der Pflasterung bestimmt wird. In dem in Abbildung 59 dargestellten Beispiel beträgt zum Zeitpunkt des einsetzenden Sickerabflusses die Beregnungshöhe ca. 22 mm, wovon ca. 13 mm in den Oberbau infiltriert sind und dort zunächst zwischengespeichert werden.

Mit fortlaufender Beregnung dringt die Infiltrationsfront tiefer in die Tragschicht ein und die Sickerabflussrate an der Unterkante der Tragschicht steigt an. Die Ganglinien der Versickerungsrate und des Sickerabflusses nähern sich daher allmählich einander an, bis sie nahezu deckungsgleich weiterverlaufen. Ab diesem Moment herrschen im Pflasteraufbau samt Tragschicht (sog. Oberbau) nahezu stationäre Strömungsverhältnisse.

Mit Ende der Beregnung endet der Wasserzustrom in den Oberbau und der hydraulische Gradient zwischen der Ober- und der Unterkante der Tragschicht nimmt ab. Aufgrund des hohen Anteils an schnell entwässernden Grobporen sinkt damit auch die Abflussrate aus der Tragschicht rasch ab. Nach 15-30 Minuten verlangsamt sich der Rückgang der Sickerabflussrate kontinuierlich. Gut zwei Stunden nach Ende der Beregnung verlassen nur noch kleine Wassermengen die Tragschicht.

Die TDR-Sonden im Innern der Tragschicht spiegeln diese Prozesse wider. Mit einsetzender Beregnung und entsprechender Infiltration erhöht sich zunächst der Wassergehalt in den oberen Bereich der Tragschicht unmittelbar unterhalb der Bettungsschicht (TDR-Sonde 6). Zeitverzögert steigen auch die Wassergehalte in den tieferen Bereichen der Tragschicht (TDR-Sonden 4 und 2). In den oberen Bereichen liegt dabei zu Beginn der Beregnung ein wesentlich geringerer Anfangswassergehalt vor als in den tieferen Horizonten der Tragschicht.

Aufgrund der freien Drainage werden die Porenräume des Tragschichtmaterials nur teilweise gefüllt. Bei der in Abbildung 59 dargestellten Beregnung von 100 l/(s·ha) betrug der maximal in der Tragschicht gemessene volumetrische Wassergehalt lediglich rd. 17%, was einem Sättigungsgrad von deutlich unter 50% entspricht. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Saugspannungen auf vergleichsweise niedrigem Niveau liegen. Eine Aufsättigung der feineren Poren ist nicht erforderlich, um das einsickernde Wasser durch die Tragschicht nach unten zu transportieren. Entsprechend steigen auch die Wassergehalte in den tieferen Bereichen nur geringfügig an.

Mit Ende der Beregnung sinkt der Wassergehalt im oberen Bereich der Tragschicht sehr rasch ab, da das in den Grobporen des Schottermaterials gespeicherte Wasser aufgrund des geringen Matrixpotenzials leicht abfließen kann. Bis die Wassergehalte wieder die Ausgangswerte unmittelbar vor der Beregnung einnehmen, vergehen rd. 10-15 Stunden. Dabei weisen die tiefer liegenden



Bereiche aufgrund des vertikal nach unten abnehmenden Gravitationspotenzials in der Regel höhere Wassergehaltswerte auf als höher liegende.

Abbildung 60: Messwertdarstellung für einen Beregnungsversuch an Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle (200 g/m² Quarzmehl, r = 200 l/(s·ha))

Für das zweite dargestellte Beispiel in Abbildung 60 ergeben sich ganz ähnliche Sachverhalte. Allerdings ist hier neben der Beregnungsintensität insbesondere auch das Infiltrationsvermögen aufgrund des geringeren Kolmationsgrades der Deckschicht höher, so dass mehr Wasser in die Tragschicht eindringen kann (in etwa doppelt so viel). Dadurch steigt der Wassergehalt in den oberen Tragschichthorizonten schneller an und erreicht zudem insgesamt etwas höhere Werte von knapp unter 20%. Damit ist mehr Porenvolumen am Wassertransport beteiligt als beim vorherigen Beispiel. Der Sickerabfluss aus der Tragschicht setzt ebenfalls früher ein. Das bis zu diesem Zeitpunkt in den Oberbau infiltrierte und dort zwischengespeicherte Volumen liegt dabei wiederum bei rd. 13 mm, steigt aber ebenso wie im ersten Beispiel noch weiter an, da sich noch kein Strömungsgleichgewicht zwischen Ober- und Unterkante des Pflasteraufbaus eingestellt hat. Es zeigt sich, dass selbst bei mäßigen Sättigungsgraden nennenswerte Wassermengen in der Größenordnung von 15 mm im Oberbau einer Pflasterfläche gespeichert werden.

Ingesamt wurden im Rahmen der Laboruntersuchungen die in nachstehender Matrix aufgeführten Beregnungsversuche an fugenarmem Doppelverbundpflaster für die unterschiedlichen Randbedingungen und Flächenzustände durchgeführt (Abbildung 61).

Flächencharakteristik			Niederschlagsbelastung (Beregnungscharakteristik)											
Gefälle	Quarzmehl	Kolmationsgrad	konstante Beregnungsintensität [l/(s.ha)]										Modellregen	Infiltr.
			25	50	75	100	150	200	300	500	750	1000	$(n = 0, 2 a^{-1})$	test
2,5%	—	Neuzustand												
	200 g/m ²	mäßige Kolmation												
	400 g/m ²	ausgeprägte Kolmation												
	500 g/m²	starke Kolmation												
5,0%	—	Neuzustand												
	200 g/m ²	mäßige Kolmation												
	400 g/m ²	ausgeprägte Kolmation												
7,5%	_	Neuzustand												
	200 g/m ²	mäßige Kolmation												
	400 g/m ²	ausgeprägte Kolmation												

Abbildung 61: Matrix der an fugenarmem Doppelverbundpflaster durchgeführten Beregnungsversuche¹⁶⁵

¹⁶⁵ dunkel markierte Felder repräsentieren jeweils einen oder mehrere Tests für die jeweilige Beregnungsintensität; die Matrix umfasst Versuche der Serien 3 und 5

Nachfolgend werden die Ergebnisse einzelner Versuche einander gegenübergestellt, um den Einfluss der Beregnungsintensität und des Gefälles auf das Versickerungsverhalten zu dokumentieren. Darüber hinaus wird erörtert, in welcher Größenordnung sich eine zunehmende Kolmation des Fugenmaterials für diesen Belagstyp auf die Versickerungsrate niederschlägt und inwiefern unterschiedlich lange Trockenperioden vor einer Beregnung bzw. unterschiedliche Sättigungsgrade im Oberbau die Infiltrationskapazität beeinflussen können.

Abbildung 62 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 ähnlich wie am Versuchsfeld in Lingen ein signifikanter Einfluss der Beregnungsintensität auf das Infiltrationsvermögen beobachtet. Die Infiltrationsrate nahm auch am Lysimeter bei höheren Beregnungsintensitäten z.T. deutlich höhere Werte an als bei geringeren Intensitäten.



Abbildung 62: Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei mäßigem sowie bei ausgeprägtem Kolmationsgrad in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität (2,5% Gefälle)¹⁶⁶

Für den gering bis mäßig kolmationsbeeinflussten Belag schwankte die Versickerungsrate zwischen rd. 80 $I/(s\cdot ha)$ und 140 $I/(s\cdot ha)$ bei Beregnungsintensitäten

¹⁶⁶ TP: Dauer der Trockenperiode vor Beregnungsbeginn

von 100-200 l/(s·ha). Bei dem mit 400 g/m² Quarzmehl beaufschlagten Belag war die Spannweite bezogen auf die Absolutwerte nicht ganz so groß. Hier variieren die Werte zwischen rd. 50 l/(s·ha) und 80 l/(s·ha) bei Beregnungsintensitäten zwischen 100 l/(s·ha) und 500 l/(s·ha).

Die Infiltrationsrate zeigt dabei für alle Beregnungsintensitäten einen relativ konstanten Verlauf. Lediglich in den ersten Minuten können höhere, z.T. aber auch niedrigere Werte auftreten. Die Aussagefähigkeit der Werte in den Anfangsminuten ist jedoch begrenzt, da in diesem Zeitraum die Beregnungsintensitäten der Anlage mitunter erheblich schwanken, bis sich der gewünschte Sollwert der Beregnungsintensität einstellt. Darüber hinaus erfolgt in dieser Versuchsphase die Benetzung der Oberfläche, die messtechnisch nicht erfasst wird. Die für die ersten Minuten des Versuchs ermittelten Infiltrationsraten sind daher nicht ganz exakt. Im weiteren Verlauf der dargestellten Versuche änderte sich die Infiltrationsrate bei anhaltender Beregnungsintensität lediglich in einem Wertebereich von maximal ± 15 l/(s·ha).

Warum die Infiltrationsrate im Laufe der Beregnungen mal leicht ansteigt, mal nahezu konstant bleibt und mal leicht abfällt, kann anhand der Messdaten nicht eindeutig aufgeklärt werden. Hierzu wären Kenntnisse des Matrixpotenzials in den unterschiedlichen Bereichen des Oberbaus (insbesondere des Fugenmaterials) erforderlich. Der Anstieg der Infiltrationsrate bei anhaltender Beregnung mit konstanter Intensität ist jedoch ein Indiz dafür, dass sukzessive Feinporen im Oberbau der Pflasterfläche (vermutlich im Fugenraum) mit Wasser gefüllt werden und sich somit der am Wassertransport teilnehmende Abflussquerschnitt lokal erhöht. Dies kann bspw. dadurch bedingt sein, dass sich die in Porenräumen gefangene Luft im Wasser löst, als Luftbläschen ausgetragen wird oder die durch Wasser verdrängte Luft erst allmählich in die Atmosphäre entweichen kann. Eine sinkende Infiltrationsrate kann sich möglicherweise dadurch ergeben, dass sich der hydraulische Gradient im Oberbau sukzessive verändert.

Nichtsdestotrotz dokumentiert Abbildung 62, in welchem Maße sich ein Feinpartikeleintrag in die Fugen auf das Versickerungsvermögen des Pflasterbelages auswirkt. Während bei Versuchen im Neuzustand (hier nicht dargestellt) selbst für Beregnungsintensitäten von bis zu 300 l/(s·ha) kein Oberflächenabfluss zu verzeichnen war, reduziert sich die Versickerungsrate bei einer Feinpartikelmenge von rd. 200 g/m² erheblich; in etwa auf die Hälfte. Bei einer Feinpartikelmenge von rd. 400 g/m² (bzw. zusätzlichen 200 g/m²) verringert sich das Infiltrationsvermögen nochmals erheblich und liegt dann noch in der Größenordnung von 70 l/(s·ha). Unter Berücksichtigung des versickerungswirksamen Fugenanteils von rd. 4,5% entspricht dies Durchlässigkeitswerten des Fugenmaterials von rd. 7·10⁻⁴ m/s im Neuzustand sowie von 1·10⁻⁴ m/s im Gebrauchszustand.

Für die hier nicht dargestellten Versuche mit einer Quarzmehlmenge von 500 g/m² – also einer um nochmals 25% erhöhten Feinpartikelmenge – wurde

dagegen nur noch eine geringfügige Reduzierung der Infiltrationsleistung festgestellt. Dies bekräftigt die Einschätzung, dass bereits bei einer Quarzmehlmenge von 400 g/m² ein ausgeprägter Kolmationsgrad vorliegt, was auch von den aus den Infiltrometermessungen abgeleiteten Häufigkeitsverteilungen gestützt wird.

Die Grafik links in Abbildung 62 belegt darüber hinaus die überaus zufrieden stellende Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse. Die Grafik zeigt zu den drei angegebenen Beregnungsintensitäten die Ergebnisse aus jeweils zwei Einzelversuchen. Dabei repräsentieren die Werte der Versuchsreihen V3.2 und V3.5 die Ergebnisse bei vollständig neuem Einbau des Belages samt Tragschicht und samt neuerlicher Einspülung von 200 g/m² Quarzmehl in den Fugenraum. Die gemessenen Versickerungsraten schwanken dabei lediglich in einem Wertebereich von maximal \pm 15 l/(s·ha), was einer relativen Schwankungsbreite von rd. 10% entspricht.

Der Einfluss des Oberflächengefälles auf das Versickerungsvermögen eines Doppelverbundpflasters wird in Abbildung 63 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 63: Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters in Abhängigkeit von Beregnungsintensität, Kolmationsgrad und Gefälle (D = 15 min)

Im Neuzustand spielt das Oberflächengefälle bei den betrachteten Niederschlagsintensitäten von 100-200 I/(s·ha) keine Rolle, da das Infiltrationsvermögen deutlich höher ist. Bei geringem bis mäßigem Feinpartikeleintrag und entsprechend herabgesetztem Versickerungsvermögen wird dagegen ein nennenswerter Einfluss sichtbar. Während sich die Versickerungsraten für Neigungen von 2,5% und 5,0% kaum unterscheiden, resultieren für den um 7,5% geneigten Belag um rd. 20 I/(s·ha) geringere Werte. Dies entspricht einer Reduktion der Infiltrationsleistung von ca. 20%. Für den stärker kolmatierten, mit 400 g/m² Quarzmehl beaufschlagten Belag ergeben sich ähnliche Ergebnisse. Hier unterscheiden sich die Versickerungsraten aller drei betrachteter Gefällestufen. Bei einer Oberflächenneigung von 5,0% reduziert sich die Versickerungsleistung gegenüber einem Gefälle von 2,5% um rd. 20%. Für ein Oberflächengefälle von 7,5% ergeben sich je nach Beregnungsintensität um 25%-35% niedrigere Werte.

Mit zunehmendem Kolmationsgrad nimmt somit der Einfluss des Oberflächengefälles auf das Versickerungsvermögen zu. 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. Darauf deuten auch die am Versuchsfeld in Lingen erhobenen Messungen hin.

Abbildung 63 verdeutlicht darüber hinaus erneut die Abhängigkeit des Versickerungsvermögens von der jeweiligen Beregnungsintensität sowie dem starken Einfluss eines Feinpartikeleintrages in den Fugenraum. Der Kolmationsgrad ist der äußere Einflussfaktor, der die wohl stärkste Auswirkung auf das Versickerungsvermögen einer Pflasterfläche hat. Er ist aber auch derjenige, der aufgrund seines stochastischen Charakters in der Praxis am wenigsten vorhersehbar bzw. örtlich zutreffend quantifizierbar ist.

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.¹⁶⁷ Im Rahmen der Lysimeterversuche zeigte sich dieses Phänomen besonders deutlich an einem Beregnungsversuch mit variabler

¹⁶⁷ vergleiche hierzu auch Kapitel 4.3.1

Beregnungsintensität, der für den Belag aus fugenarmem Doppelverbundpflaster bei einer aufgetragenen Quarzmehlmenge von 400 g/m² durchgeführt worden ist.

Bei diesem Versuch wurde eine Niederschlagsbelastung gefahren, deren Intensitätsverlauf einem vereinfachten Modellregen des Euler-Typs II entspricht. Die zweistündige Beregnung setzte sich dabei aus fünf unterschiedlich langen Beregnungsintervallen zusammen mit einer ausgeprägten Intensitätsspitze von 220 l/(s·ha) nach dem ersten Viertel der Beregnungsdauer. Bezogen auf die Starkniederschlagsstatistik der Stadt Gelesenkirchen kann der Niederschlagshöhe eine statistische Überschreitungshäufigkeit von n = 0,2 a⁻¹ zugewiesen werden.¹⁶⁸ Der Beregnungsverlauf ist zusammen mit den resultierenden Ganglinien des Oberflächenabflusses und der Infiltrationsrate in Abbildung 64 dargestellt.



Abbildung 64: Messwertdarstellung für einen Laborversuch mit intensitätsvariabler Beregnung an einem Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle und ausgeprägtem Kolmationsgrad

Während des Versuches durchlief die Beregnung einen sequenziellen Intensitätszyklus von 40, 65, 220, 30 und 17 l/(s·ha), wobei die Länge der Intervalle zwischen 10 Minuten bei der höchsten und 60 Minuten bei der geringsten Intensität variierte. Bei der anfänglichen Beregnungsintensität von 40 l/(s·ha) setzte nach rd. drei Minuten und einer Beregnungshöhe von 0,8 mm Oberflächenabfluss ein, obwohl in vorangegangenen Beregnungsversuchen bei höheren Beregnungs-

¹⁶⁸ DWD (2005)

intensitäten Versickerungsraten von 50-80 $I/(s \cdot ha)$ ermittelt wurden. Hier stellte sich jedoch eine Infiltrationsrate von lediglich rd. 34 $I/(s \cdot ha)$ ein.

Nach 15 Minuten wurde die Beregnungsintensität auf 65 l/(s·ha) erhöht. Dabei stieg auch die Infiltrationsrate innerhalb von wenigen Minuten auf einen Wert von rd. 47 l/(s·ha) an. An dieses Beregnungsintervall schloss sich der Beregnungsabschnitt mit der Intensitätsspitze von 220 l/(s·ha) an. Wiederum stieg dabei die Infiltrationsrate mit der Beregnungsintensität mehr oder weniger sprunghaft an und pendelte sich bei einem Wert von rd. 60 l/(s·ha) ein. Im Vergleich zum ersten Beregnungsintervall hatte sich damit die Versickerungsrate fast verdoppelt. In den nachfolgenden Beregnungsintervallen mit deutlich geringeren Beregnungsintensitäten von 30 l/(s·ha) und 17 l/(s·ha) entstand dagegen kein nennenswerter Oberflächenabfluss mehr. Hier konnte der Pflasterbelag die beaufschlagte Beregnungsintensität nahezu vollständig aufnehmen.

Ebenso wie für die Niederschlagsbelastung variabler Intensität zeigt sich das mit der Regenspende deutlich zunehmende Versickerungsvermögen auch in der Gegenüberstellung der Infiltrationsraten, die aus der Vielzahl der Versuche bei jeweils konstanter Intensität gewonnen wurden. Exemplarisch sind in Abbildung 65 die Infiltrationsraten bei 20-minütiger Beregnung und bei einem Gefälle von 2,5% nach der Regenspende aufgetragen. Zum Vergleich sind die auf dem Versuchsfeld F10 in Lingen mit vergleichbarem Pflasteraufbau registrierten Versickerungsleistungen ebenfalls angegeben.





Die Versuchsergebnisse bekräftigen, dass zwischen dem momentanen Versickerungsvermögen einer Pflasterfläche und der aktuellen Niederschlagsintensität ein signifikanter Zusammenhang besteht und bestätigen damit prinzipiell die in Kapitel 4.3.1 erörterten Messerergebnisse an Bestandsflächen, für die sogar eine noch deutlichere Zunahme der Versickerungsleistung mit der Regenintensität zu verzeichnen ist. Über die Ursache dieses Phänomens kann dagegen ohne weitergehende Untersuchungen nur gemutmaßt werden. Nachfolgend werden dennoch einige Hypothesen zur Erklärung des Phänomens aufgestellt.

Aller Wahrscheinlichkeit nach liegt das Phänomen im kleinräumigen Versickerungsverhalten des Fugenraumes begründet. Ansonsten dürfte sich angesichts der vergleichsweise langsamen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Infiltrationsfront durch den gesamten Pflasteraufbau die Anpassung der Versickerungsrate an die Beregnungsintensität nicht so rasch vollziehen.

Diese Vermutung äußert auch Flöter – zumindest indirekt – indem er postuliert, dass bei höheren Regenintensitäten die auftreffenden Wassertropfen aufgrund der höheren Fallgeschwindigkeit tiefer in den Boden gepresst werden.¹⁶⁹ Seiner Ansicht nach bedingt dies zusammen mit dem hohen Anteil an Grobporen im Füllmaterial der Fugen, dass dort der Sättigungsgrad bei schwächeren Regen deutlich geringer ist als bei Niederschlägen höherer Intensität. Eine Bestätigung dieser These steht bislang jedoch aus.

De facto bedingt eine Teilsättigung eine gegenüber dem Sättigungszustand reduzierte hydraulische Leitfähigkeit, da perkolierendes Wasser um die Hohlräume herum fließen muss und der am Wassertransport teilnehmende Abflussquerschnitt deutlich geringer ist. Das Verhältnis zwischen ungesättigter und gesättigter Leitfähigkeit kann dabei durchaus über zwei Zehnerpotenzen betragen. Nach Flöters Ansicht kann dies dazu führen, dass bei intensitätsschwachen Niederschlägen insbesondere zu Beginn weniger Wasser infiltrieren kann als bei Starkregenereignissen. In welchem Maße die Fallgeschwindigkeit der Regentropfen die Aufsättigung und damit die hydraulische Leitfähigkeit tatsächlich beeinflussen kann, ist jedoch ungewiss.

Daneben erscheint es durchaus plausibel, dass kleinräumige Inhomogenitäten im Versickerungsvermögen zu dem oben beschriebenen Effekt maßgeblich beitragen können. Zum einen variiert kleinräumig der versickerungsaktive Anteil einer Pflasterfläche infolge von Lageungenauigkeiten der Pflastersteine oder ungleichmäßigen Fugenweiten. Darüber hinaus ist generell nicht zu erwarten, dass an jedem Punkt einer Pflasterfläche die Fugenfüllung die exakt gleiche Wasserdurchlässigkeit aufweist. Unterschiedlich große Körner des Füllmaterials bedingen zusammen mit der losen Verfüllung des Materials, dass sich zufällig Porenräume ganz unterschiedlicher Größe und Struktur ergeben. Dabei verhindern bspw.

¹⁶⁹ Flöter, O. (2006), S. 117

einzelne größere Körner mitunter das Nachrieseln feinerer Körner, so dass sich ganz punktuell größere Hohlräume bilden. Umgekehrt sind ebenso kleinräumige Bereiche mit besonders dichter Lagerung des Fugenmaterials und entsprechend geringerer Wasserdurchlässigkeit zu erwarten. Eine Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit des Fugenmaterials um lediglich $1 \cdot 10^{-5}$ m/s entspräche dabei immerhin einer Differenz im Versickerungsvermögen von 100 l/(s·ha).

Während eines Regenereignisses ergeben sich dann kleinräumige Bereiche, in denen das Versickerungsvermögen tatsächlich ausgeschöpft ist, sowie Bereiche, in denen noch wesentlich mehr Wasser versickern könnte, das potenzielle Versickerungsvermögen hier jedoch nicht ausgeschöpft wird. Bei einem stärkeren Ereignis dagegen wird auch die Versickerungskapazität der höher durchlässigen Bereiche weiter ausgereizt und das Versickerungsvermögen der Gesamtfläche scheint zu steigen. Kleinräumig gesehen hat sich dabei die Infiltrationskapazität eines einzelnen Abschnittes nicht unbedingt mit der Beregnungsintensität erhöht. In der Summe der Einzelabschnitte entsteht jedoch der Effekt einer mit der Niederschlagsintensität ansteigenden Versickerungsfähigkeit der Pflasterfläche.

Verstärkt werden könnte dieser Effekt zudem durch präferentielle Fließwege, die an der Grenzfläche zwischen Pflasterstein und Fugenraum vorliegen oder durch Wurzelkanäle von im Fugenraum angesiedelter Kleinvegetation hervorgerufen werden können. Ebenso ist bislang unbekannt, inwiefern nicht infiltriertes Wasser auf seinem Fließweg über die Oberfläche an einer anderen Stelle des Belages noch infiltrieren kann. Auch dies könnte zu dem o.g. Effekt beitragen. Diese Hypothesen können jedoch ebenso wenig wie die Einschätzung von Flöter anhand der Messergebnisse der Laborversuche oder der Ergebnisse der Infiltrometermessungen belegt werden. Hierzu wären weitergehende Untersuchungen zum expliziten Wasserhaushalt des Fugenmaterials auf kleiner Skala erforderlich.

Für den Pflasterbelag aus Doppelverbundsteinen wurde analysiert, inwiefern sich unterschiedlich lange Trockenperioden vor einem Regenereignis bzw. einer Beregnung auf das Versickerungsvermögen auswirken. In der Literatur wird davon berichtet, dass bei einer ausgeprägten Vorbefeuchtung das Versickerungsvermögen herabgesetzt sein kann oder zumindest das hohe Anfangsinfiltrationsvermögen infolge der bereits vorgefüllten Porenräume im Oberbau unterdrückt wird.¹⁷⁰ Andererseits fanden bspw. Schramm und Münchow¹⁷¹ in ihrer Untersuchung z.T. auch erhöhte Versickerungsleistungen bei vorgenässten Pflasterbelägen. Im Rahmen der Feldmessungen an Bestandstandsfläche haben sich beide Beobachtungen durchaus bestätigt. Ein Einfluss der Vorbefeuchtung auf das

¹⁷⁰ z.B. Nolting, B. et al. (2005)

¹⁷¹ z.B. in Schramm, M. und Münchow, B. (1995)

Versickerungsvermögen konnte beobachtet, eine klare Korrelation aber nicht nachgewiesen werden.

Generell scheinen hier zwei konkurrierende Prozesse wirksam zu sein. Einerseits ist die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenmatrix bei höheren Sättigungsgraden höher. Andererseits fehlt das zu Beginn eines Regens rasch auffüllbare Porenvolumen der sehr weiten Grobporen. Zudem kann bei trockenerem Zustand ein höheres, den Wassertransport antreibendes Potenzialgefälle vorliegen. Hier besteht bislang noch ein ausgeprägtes Kenntnisdefizit.

Im Rahmen der Laborversuche wurden für den Pflasteraufbau mit 2,5% Gefälle für alle betrachteten Kolmationsgrade 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 \geq 24 Stunden.

Die Ergebnisse der Wassergehaltsmessung sowie die ermittelten Infiltrationsraten sind für den mit 400 g/m² Quarzmehl beaufschlagten Belag in Abbildung 66 für zwei Zeitskalen dargestellt.

Innerhalb von wenigen Minuten nach Einsetzen des ersten Beregnungsintervalls, nach vorheriger Trockenperiode von rd. vier Tagen, pendelt sich die anfängliche hohe Versickerungsrate auf einem Niveau von knapp 70 l/(s·ha) ein. Mit einer Verzögerung von ca. 15 Minuten beginnt der Wassergehalt in den oberen Tragschichthorizonten an zu steigen (TDR-Sonde 6). Dies ist die Zeitspanne, die das infiltrierte Wasser benötigt, um durch den Fugenraum, die Pflasterbettung sowie die ersten Zentimeter der Tragschicht zu perkolieren.

Aufgrund der längeren Trockendauer liegt der Wassergehalt zu Beginn des Versuches bei 6%. Innerhalb der nächsten 25 Minuten steigt er lediglich auf 14% an. Die Beregnungshöhe von 27 mm bzw. die davon in den Oberbau infiltrierte Wassermenge von rd. 14 mm führt also nur zu einer mäßigen Aufsättigung der oberen Tragschichtbereiche. Die Wassergehalte in der Mitte und im tieferen Bereich der Tragschicht steigen erst nach Ende des ersten Beregnungsintervalls an (TDR-Sonden 2 und 3); der Sickerabfluss (hier nicht dargestellt) setzt sogar erst nach rd. 90 Minuten ein.

Nach Ende des ersten Beregnungsabschnittes sinkt der Wassergehalt in den oberen Tragschichthorizonten – wiederum mit einer Verzögerung von rd. 10 Minuten – rasch ab und hat nach zwei Stunden ein Niveau von 10% erreicht. Zu diesem Zeitpunkt setzt das zweite Beregnungsintervall ein. Dabei pendelt sich die Infiltrationsrate rasch bei rd. 65 l/(s·ha) ein; also auf einem Niveau, das nur geringfügig unterhalb des Wertes der ersten Beregnung liegt. Die Wassergehalte in den tiefer liegenden Horizonten sind bis dahin nur geringfügig auf Werte von



13%-14% abgefallen. Während der anhaltenden Beregnung steigt die Infiltrationsrate noch leicht an.

Abbildung 66: Messergebnisse der Versickerungsrate und des Wassergehaltes bei intermittierender Beregnung an einem Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle bei ausgeprägter Kolmation (400 g/m² Quarzmehl)

Infolge der wieder einsetzenden Beregnung steigt auch der Wassergehalt an TDR-Sonde 6 wieder an; diesmal aufgrund des etwas höheren Wassergehaltes zu Beginn der Beregnung bereits nach rd. fünf Minuten. Dennoch erreicht er auch diesmal lediglich Werte von rd. 14%. Die Wassergehalte an den TDR-Sonden 2 und 3 steigen bei der zweiten Beregnung dagegen auf etwas höhere Werte von 16% bzw. 17%, da im Oberbau noch das Infiltrationsvolumen des ersten Beregnungsintervalls gespeichert ist. Dadurch setzt relativ abrupt ein deutlicher

Sickerabfluss aus der Tragschicht ein, der bei den weiteren Beregnungsintervallen bei längeren Trockenperioden weniger hoch ausfällt.

Ähnlich wie nach dem ersten Beregnungsintervall nehmen die Wassergehalte in der Tragschicht auch nach Ende der zweiten Beregnung zeitverzögert und unterschiedlich stark ab, bis nach einer Trockenperiode von diesmal vier Stunden das dritte Beregnungsintervall beginnt. Die Wassergehalte liegen zu diesem Zeitpunkt auf ähnlichen Niveaus wie zu Beginn des zweiten Beregnungsintervalls und die Versickerungsrate nimmt wieder ein Wert von rd. 65 l/(s·ha) ein. Auch die Veränderungen der Wassergehalte während der Beregnung erfolgen wie schon bei dem Beregnungsintervall zuvor.

An die dritte Beregnung schließt sich eine längere Trockenperiode von 15 Stunden an, in der die Wassergehalte in der Tragschicht weiter absinken können als in der Trockenperiode zuvor. Dennoch stellt sich wiederum eine Versickerungsrate in der gleichen Größenordnung wie zuvor ein, wobei sie im Mittel über das Beregnungsintervall geringfügig höhere Werte aufweist als bei den vorangegangenen Beregnungsintervallen mit deutlich kürzeren Trockenperioden.

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. Dies mag zwar nicht zuletzt an der nahezu freien Drainage im Versuchsaufbau liegen, dennoch konnte gezeigt werden, dass erhebliche Wassermengen in der Tragschicht gespeichert werden können, ohne eine nennenswerte Reduzierung des Versickerungsvermögens hervorzurufen. Im Falle eines gering durchlässigen Planums (unterhalb der Tragschicht) ist davon auszugehen, dass nur bei besonders intensitätsstarken und lang anhaltenden Regenereignissen eine ausgeprägte Aufsättigung der Tragschicht erfolgt und sich die Versickerungsrate – mit entsprechender zeitlicher Verzögerung – auf die jeweilige hydraulische Leitfähigkeit des anstehenden Untergrundes reduziert.

Im Rahmen der Laborversuche konnte dagegen – unabhängig vom Kolmationsgrad der Pflasterfläche – kein besonders ausgeprägter Zusammenhang zwischen dem Versickerungsvermögen und der Dauer der Trockenperiode vor einer intensitätsstarken Beregnung festgestellt werden. Bei den Intervallberegnungen nahm die Versickerungsrate tendenziell mit der Länge der Trockenperiode nur geringfügig zu. Im Vergleich zur Beregnung nach einer Trockenphase von ein bis vier Tagen lag die Infiltrationsrate nach nur zweistündiger Beregnungspause um rd. 10% niedriger. Allerdings wurden für die Trockenperioden von 15 Stunden sowohl niedrigere als auch höhere Infiltrationsraten registriert, die nicht ganz ins Bild passen und nicht eindeutig erklärt werden können. Die Wassergehalte in den oberen Tragschichtbereichen lagen vor Beginn des dritten Beregnungsintervalls in allen Versuchen auf ähnlichem Niveau (7,9%-8,5%). Über die Wassergehalte in den Fugen und in der Pflasterbettung können dagegen keine Aussagen getroffen werden. Möglicherweise bedingen sie die auffälligen Werte.

Die Zusammenhänge zwischen den Versickerungsraten der Deckschicht und den Wassergehalten in der Tragschicht, unmittelbar unterhalb der Pflasterbettung, sind exemplarisch für die Belag mit ausgeprägtem Kolmationsgrad in Abbildung 67 bei verschiedenen Trockenperioden dargestellt.





Mit zunehmender Dauer einer Trockenphase steigt die Infiltrationsrate tendenziell leicht an. Gleichermaßen setzt der Anstieg des Wassergehaltes am Übergang von der Pflasterbettung zur Tragschicht zunehmend später ein, da zunächst Porenräume im Fugenmaterial und in der Pflasterbettung gefüllt werden müssen, bevor das in den Oberbau infiltrierte Wasser nach unten weiter transportiert werden kann.

Darüber hinaus liegt der Wassergehalt zu Beginn der Beregnung auf umso niedrigerem Niveau, je länger die vorangegangene Trockenphase andauert. Dafür erfolgt der Anstieg des Wassergehaltes zu Beginn schneller (wenn auch später), da der Anteil rasch füllbarer Grobporen größer ist. Dies ist durch einen entsprechend steileren Verlauf der Wassergehaltsganglinie gekennzeichnet. Gleichwohl wird in den oberen Tragschichthorizonten unabhängig vom Anfangswassergehalt im Laufe der Beregnung der nahezu gleiche Sättigungsgrad erreicht. Inwiefern umgekehrt der Wassergehalt in der Tragschicht die Höhe der Infiltrationsrate beeinflusst, kann dagegen anhand der oben dargestellten Korrelationen nicht abgeleitet werden. Hierzu wären u.a. Kenntnisse des Matrixpotenzials sowie des gravimetrischen Potenzials erforderlich, die aber nicht vorliegen.

Dennoch wird davon ausgegangen, dass das Infiltrationsverhalten des Deckbelages bzw. des Fugenmaterials weitgehend unabhängig vom Sättigungsgrad und der hydraulischen Leitfähigkeit der Tragschicht ist, solange am Übergang zur Pflasterbettung keine Sättigung vorliegt und die Leitfähigkeit des Schottermaterials eine übliche Größenordnung aufweist. Dies ist dadurch zu erklären, dass das Versickerungsvermögen eines Pflasterbelages weitgehend durch die Infiltrationsleistung des Fugenmaterials bestimmt wird.

Die Fugenfläche nimmt bei den üblichen Pflasterbauweisen lediglich ein Fünftel bis ein Fünfundzwanzigstel der Pflasterfläche ein. Bei dem hier betrachteten Doppelverbundpflaster liegt der Fugenanteil bei ca. 4,5%. Auch wenn das Fugenfüllmaterial selbst eine höhere Wasserdurchlässigkeit als das Tragschichtmaterial aufweist, wird dies durch die unterschiedlich großen versickerungsaktiven Flächenanteile mehr als kompensiert. Bezogen auf die Grundfläche ist das Versickerungsvermögen der Tragschicht daher oftmals deutlich höher als das der Deckschicht. Dies gilt insbesondere für fugenarme Pflaster- und Plattenbelägen, bei den die Fugenanteile gering sind und das feinkörnige Füllmaterial (i.d.R. Sand) geringere hydraulische Leitfähigkeiten aufweist als bspw. ein Splitt, der bei größeren Fugenweiten eingesetzt werden kann. Diese These wird sowohl von weiteren Versuchen gestützt, die für einen Pflasteraufbau mit und ohne Tragschicht sowie an einer Tragschicht in singulärer Anordnung (ohne Pflasterdeckung) durchgeführt wurden, als auch durch die im Anhang dargestellten Korrelationskurven, in denen der Infiltrationsraten nach den zugehörigen Wassergehalten in den oberen Tragschichthorizonten aufgetragen sind (Abbildung A - 39). Ein signifikanter Zusammenhang zwischen den beiden Größen ist dort nicht zu erkennen.

Neben der Analyse der Abflussbildungs- und Versickerungsprozesse wurden aus den Messergebnissen der Beregnungsversuche Abflussbeiwerte abgeleitet. Sie werden in Teil C dieser Arbeit in der Überlagerung mit den Ergebnissen der vorangegangen Untersuchungsschritte (Kapitel 4.1 bis 4.3) zur Formulierung von flächentypspezifischen Empfehlungswerten herangezogen. Abbildung 68 und Abbildung 69 zeigen die Spitzenabflussbeiwerte, die sich für fugenarmes Doppelverbundpflaster in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität und des Kolmationsgrades für unterschiedliche Dauerstufen ergeben haben.

Der Abflussbeiwert nimmt in der Regel erst für Beregnungsintensitäten von über 50 l/(s·ha) Werte größer Null an, da für geringere Intensitäten kein Oberflächenabfluss verzeichnet wurde. Für Beregnungsintensitäten zwischen 50 l/(s·ha) und 200 l/(s·ha) wächst er dagegen sehr rasch an und strebt dann gegen eins. Dabei



werden Werte über 0,80 erst bei Beregnungsintensitäten von über 300 l/(s·ha), Werte über 0,90 im betrachteten Intensitätsspektrum gar nicht erreicht.

Abbildung 68: Abflussbeiwerte eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei 2,5% Gefälle und ausgeprägter Kolmation für verschiedene Dauerstufen



Abbildung 69: Abflussbeiwerte eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei 2,5% Gefälle und mäßiger Kolmations für verschiedene Dauerstufen

So variiert bspw. der Spitzenabflussbeiwert des betrachteten Doppelverbundpflasters bei einer 30-minütigen Beregnung und ausgeprägtem Kolmationsgrad zwischen Werten von 0,20 und 0,70 für Beregnungsintensitäten von 75-200 l/(s·ha). Für eine Beregnungsintensität von 500 l/(s·ha) ergab sich ein Abflussbeiwert von 0,84. Dies bekräftigt die Forderung aus Kapitel 2, Abflussbeiwerte stets in Bezug zu einem expliziten Intensitätsbereich zu sehen und zu verwenden.

Da sich im Rahmen der Laborversuche bei vorwiegend konstanten Beregnungsintensitäten über die Beregnungsdauer relativ konstante Versickerungsraten ergeben haben, unterscheiden sich die Abflussbeiwerte für verschiedene Dauerstufen nur in recht geringem Maße. Ebenso gering fallen die Unterschiede zwischen dem mittleren Abflussbeiwert als Verhältnis von Abfluss- und Beregnungsvolumen sowie dem Spitzenabflussbeiwert aus, der als Verhältnis zwischen maximaler Abflussrate und zugehöriger Regenintensität definiert ist. Ein geringerer Kolmationsgrad drückt sich dagegen in entsprechend geringeren Abflussbeiwerten aus, die für Beregnungsintensitäten zwischen 75 l/(s·ha) und 300 l/(s·ha) in einem Wertebereich von 0,10 bis 0,60 liegen.

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. Das Rechteckpflaster war im Fischgrätverband verlegt. Als Fugenfüllmaterial wurde für beide Pflasterdeckungen gewaschener Sand verwendet.

Sowohl im Neuzustand als auch im Gebrauchszustand¹⁷² wurde bei den betrachteten Beregnungsintensitäten von 25-1000 l/(s·ha) keine nennenswerten Differenzen zwischen den Infiltrationsraten beobachtet. Ausgewählte Messergebnisse für beide Bauweisen (Versuchsserien 5.8 und 5.9) sind im Anhang aufgeführt (Abbildung A - 40). Die unterschiedliche Form der Pflastersteine sowie die Unterschiede im Fugenbild haben keinen Einfluss auf das Versickerungsvermögen, solange das Fugenmaterial und der Fugenanteil nahezu gleich sind. Auch bei anderem als dem hier betrachteten Oberflächengefälle von 2,5% ist mit einem gleichartigen Abfluss- und Versickerungsverhalten beider hier untersuchter Pflasterbauweisen zu rechnen.

¹⁷² Im Labor nachgebildet durch Auftragen und Einspülen von 400 g/m² Quarzmehl

4.4.2 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 70). Aufgrund der unterschiedlichen Plattenformate weisen die Beläge differierende Fugenanteile von 0,6%, 1,2% sowie 1,8% auf. Der prinzipielle Aufbau der untersuchten Plattenbeläge in der Lysimeteranlage sowie eine Detailübersicht der durchgeführten Versuche befindet sich im Anhang¹⁷³.



Abbildung 70: 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.

¹⁷³ Versuchsmatrix Serie 7; Aufbau siehe Abbildung A - 42

Bei den Versuchen an einem Aufbau mit konventioneller Schottertragschicht erfolgte die Beregnung sequenziell mit Intensitäten von 100 l/(s·ha), 200 l/(s·ha) sowie von 300 l/(s·ha). Zwischen den Beregnungsintervallen lag jeweils eine Trockenphase von zwei Stunden Dauer. Die resultierenden Infiltrationsraten sind für den Neuzustand in Abbildung 71, für den Gebrauchszustand in Abbildung 72 dargestellt.



Abbildung 71: Infiltrationsverläufe der untersuchten Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten im Neuzustand (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). Inwieweit sich die Versickerungsraten bei noch stärkeren als den hier betrachten Beregnungsintensitäten erhöhen könnten, kann leider nicht beurteilt werden.

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 ein vergleichsweise geringer Anstieg der Infiltrationsleistung bei steigender Beregnungsintensität zu verzeichnen, zumindest 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.



Abbildung 72: Infiltrationsverläufe der untersuchten Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten im Gebrauchszustand (Gefälle 2,5%)

Bezüglich des Versickerungsvermögens von Plattenbelägen sind in der Fachliteratur bislang kaum Messwerte an Bestandsflächen genannt. Zudem konnten im Rahmen der eigenen Datenerhebung nur vereinzelte Messungen an Plattenbeläge durchgeführt werden. Daher fällt die Einordnung des durch das Einspülen einer Quarzmehlmenge von 500 g/m² tatsächlich erreichten Kolmationsgrades schwer.

Von den in Kap. 2.4 zitierten Untersuchungen betrachteten lediglich Schramm und Münchow¹⁷⁴ Gehwegbefestigungen aus Betonplatten. Sie stellten hierbei Versickerungsraten in der Größenordnung von lediglich 15 l/(s·ha) fest, wobei sie in ihren Messungen selbst für weitaus durchlässigere Flächenbeläge – ganz im Gegensatz zu den sonst in der Fachliteratur genannten Wertebereichen – nur unwesentlich höhere Infiltrationsleistungen feststellen konnten. Daher erscheinen die angegebenen Versickerungsraten nicht verlässlich. Die vereinfachten Infiltrationsmessung, die auf dem Campusgelände der TU Kaiserslautern durchgeführt wurde, ergab für Plattenbeläge im Gebrauchszustand Infiltrationsraten von 25-

¹⁷⁴ Schramm, M. und Münchow, B. (1995)

225 I/(s·ha). Die z.T. unerwartet hohen Versickerungsleistungen wurden dabei in Bereichen mit augenscheinlich geringeren Kolmationsgraden oder mit erweiterten Fugenabständen infolge von Lageveränderungen der Betonplatten registriert.

Die im Rahmen der Laborversuche zur Nachbildung des Gebrauchszustandes verwendete Quarzmehlmenge von 500 g/m² wird daher als sachgerecht eingeschätzt und der damit erzielte Feinpartikeleintrag einem ausgeprägten bis starken Kolmationsgrad zugeordnet, wie er in der Praxis vermutlich häufig anzutreffen ist. Dabei ist jedoch durchaus denkbar, dass bei weniger ausgeprägtem Kolmationsgrad eine deutlich höhere Variation des Infiltrationsvermögens je nach Beregnungsintensität und Fugenanteil angetroffen werden kann.

Der Einfluss der Beregnungsintensität sowie des Fugenanteils für die hier betrachteten Plattenbeläge ist im Anhang nochmals am Beispiel einer Dauerstufe von 30 Minuten veranschaulicht (Abbildung A - 43 und Abbildung A - 44).

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).¹⁷⁵

Für den Versuchszyklus mit hydraulischer Sperrschicht wurde das gleiche Beregnungsmuster wie bei den Versuchen bei konventionellem Aufbau gefahren, jedoch noch ergänzt um zwei weitere Beregnungsintervalle mit Intensitäten von 400 l/(s·ha) und 500 l/(s·ha). Allerdings wurde hier das aufgestreute Quarzmehl beim Einspülvorgang nicht vollständig in die Fugen eingetragen, sondern der Kolmatierungsprozess erst während des zweiten regulären Beregnungsintervalls im Versuchszyklus abgeschlossen.¹⁷⁶ Der Versuch hat daher nur eine begrenzte Aussagekraft. Insbesondere ist ein direkter Vergleich der Versuchsergebnisse mit und ohne hydraulische Sperrschicht nur für das dritte Beregnungsintervall mit einer Intensität von 300 l/(s·ha) möglich.¹⁷⁷ Dennoch – oder gerade deshalb – lieferte der Versuch interessante Ergebnisse und wertvolle Erkenntnisse, wie die Gegenüberstellung der Messergebnisse in Abbildung 73 zeigt. In der Abbildung sind Infiltrationsraten und Wassergehalte dargestellt, die aus den Beregnungsversuchen an dem Plattenbelag mit einem Fugenanteil von 1,8% (Plattenformat 30 cm x 30 cm) gewonnen wurden.

¹⁷⁵ Die Sieblinien der beiden Materialmischungen sind im Anhang dargestellt.

¹⁷⁶ siehe Abbildung A - 45 und Abbildung A - 46 im Anhang

¹⁷⁷ Eine Wiederholung des Versuches konnte nicht mehr vollzogen werden.



Abbildung 73: Messergebnisse an Plattenbelägen mit einem Fugenanteil von 1,8%

In der oberen Grafik sind die Infiltrationsverläufe für den Neuzustand sowie den Gebrauchszustand bei einem Flächenaufbau mit homogenem Untergrund dem Infiltrationsverlauf bei Lagerung der Tragschicht auf einer geringer durchlässigen Untergrundschicht gegenübergestellt. Die beiden unteren Grafiken zeigen die Ganglinien des Wassergehalts in verschiedenen Horizonten für den Plattenaufbau mit homogener Tragschicht im Gebrauchszustand und für den Versuch mit unvollständiger Kolmatierung bei Auflage auf der hydraulischen Sperrschicht.

Die Infiltrationsverläufe dokumentieren zum einen die oben geschilderte Nachkolmatierung während des zweiten Beregnungsintervalls bei dem Versuch mit gering durchlässiger Unterlage. Zum anderen zeigen sie aber auch, in welcher Größenordnung das Infiltrationsvermögen des Plattenbelages liegt, wenn lediglich ein mäßiger Kolmationsgrad vorliegt. Für diesen Fall ergeben sich bei einer Beregnungsintensität von 100 l/(s·ha) Versickerungsraten in Höhe von rd. 70-80 l/(s·ha). Bei höheren Beregnungsintensitäten scheinen auch höhere Infiltrationskapazitäten erreicht zu werden (Beginn zweites Beregnungsintervall).

Für den Versuch im Gebrauchszustand mit homogener Tragschicht ergab sich nur ein mäßiger Anstieg des Wassergehaltes im Oberbau der Flächenkonstruktion (mittlere Grafik in Abbildung 73). Dabei erhöhte sich rd. 25 Minuten nach Beginn des ersten Beregnungsintervalls zunächst der Wassergehalt an der Oberkante der Tragschicht. Mit Fortschreiten der Infiltrationsfront nach unten stiegen nacheinander auch die Wassergehalte in der Mitte sowie an der Unterkante der Tragschicht allmählich an. Bei den beiden übrigen Beregnungsintervallen erfolgte dies ganz analog, wobei die Wassergehalte jeweils zu Beginn der einzelnen Beregnungen aufgrund der relativ kurzen Trockenphasen von lediglich zwei Stunden auf etwas höherem Niveau lagen. Einen Einfluss auf die Infiltrationsrate scheint dies jedoch nicht zu haben, was die Schlussfolgerungen aus den Versuchen an den fugenarmen Pflasterbelägen bestätigt.

Während der drei Beregnungsintervalle wurde der Plattenbelag mit insgesamt 257 mm beregnet.¹⁷⁸ Davon sind insgesamt 48 mm in den Oberbau des Plattenbelages infiltriert.¹⁷⁹ Vor Einsetzen des Sickerabflusses aus der Tragschicht, kurz vor Ende des ersten Beregnungsintervalls, war trotz der geringen Wassergehalte ein Wasservolumen von 20 mm im Oberbau zwischengespeichert.

Ganz anders stellt sich dagegen die Entwicklung des Wasserhaushaltes im Oberbau bei einer gering durchlässigen Unterlage dar.¹⁸⁰ Hier war der Wassergehalt in dem als hydraulische Sperrschicht wirkenden Planum infolge der Vorbe-

¹⁷⁸ Intervall 1: 72 mm; Intervall 2: 76 mm; Intervall 3: 109 mm

¹⁷⁹ Intervall 1: 21 mm; Intervall 2: 14 mm; Intervall 3: 13 mm

¹⁸⁰ siehe untere Grafik in Abbildung 73

regnung zu Versuchsbeginn bereits auf einem Niveau von 20% und änderte sich fortlaufend nicht.¹⁸¹

Mit Einsetzen des ersten Beregnungsintervalls nahm der Wassergehalt in der Tragschicht von unten her zu, sobald die Infiltrationsfront das Planum erreicht hatte. Der Wassergehalt in der Mitte der Tragschicht stieg dabei deutlich stärker an als der Wassergehalt an der Oberkante der Tragschicht. Er erreichte nach einer Beregnungsdauer von etwa einer Stunde ein maximales Niveau von knapp 45%, den Sättigungswassergehalt der Tragschicht. Der Sättigungszustand wurde in der Mitte der Tragschicht erst rd. 1,5 Stunden nach Ende der ersten Beregnung wieder verlassen, da fortlaufend Wasser aus den oberen Bereichen nach unten geführt wurde. Dennoch war bei Ende der Beregnung ein Wasservolumen von ca. 60 mm im Oberbau des Plattenbelages gespeichert.

Während der weiteren Beregnungsintervalle stellten sich ganz analoge Wassergehaltsverläufe dar. Der untere Teil der Tragschicht wurde mit jeder Beregnung erneut eingestaut, während an der Oberkante der Tragschicht der Sättigungszustand nicht erreicht wurde. Aufgrund des reduzierten Infiltrationsvermögens lagen die Wassergehalte hier etwas niedriger als zuvor.

Trotz der z.T. sehr hohen Wassergehalte in der Tragschicht konnte keine daraus resultierende Beeinträchtigung des Versickerungsvermögens des Deckbelages beobachtet werden. So verläuft die Infiltrationsganglinie während des dritten Beregnungsintervalls parallel zu der Infiltrationsganglinie, die sich für den Aufbau ohne Stauschicht bei gleicher Beregnungsintensität im Neuzustand ergeben hatte. Die Infiltrationsrate liegt hierbei aufgrund der nahezu abgeschlossenen Kolmatierung lediglich entsprechend niedriger und nimmt während der Beregnung von 55 l/(s·ha) auf etwa 45 l/(s·ha) ab.

Aus den Messergebnissen wird daher abgeleitet, 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. 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

¹⁸¹ Der Anfangswassergehalt von 20% hatte sich bereits bei der Vorberegnung nach rd. einer Stunde eingestellt und konnte sich bis zum Beginn des ersten Beregnungsintervalls noch nicht nennenswert reduzieren. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit konnten innerhalb von 24 Stunden lediglich rd. 35 mm durch das Planum hindurch abfließen. Dies entspricht einer mittleren Sickerabflussrate von 4 I/(s·ha) bzw. einer Leitfähigkeit von rd. 4·10⁻⁷ m/s.

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 volumenreiche 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.¹⁸²

Wie schon bei den untersuchten Pflasterbelägen aus fugenarm verlegten Betonsteinen wurden auch für die beprobten Plattenbeläge Abflussbeiwerte aus den Messdaten generiert. Auf eine Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet und auf den Anhang verwiesen (Abbildung A - 47 und Abbildung A - 48).

Inwiefern sich das Versickerungsvermögen der betrachteten Plattenbeläge für andere als die hier betrachtete Oberflächenneigung von 2,5% verändert, kann nicht quantifiziert werden. Es wird jedoch angenommen, dass mit steigendem Gefälle die Infiltrationskapazität immer stärker abnimmt; bei den Plattenbelägen mit insgesamt deutlich geringeren Fugenanteilen vermutlich noch stärker als dies für die Pflasterbeläge festgestellt werden konnte. Zudem ist generell mit einer deutlicheren Abhängigkeit vom Gefälle zu rechnen, umso geringer der Fugenanteil und umso ausgeprägter der Kolmationsgrad ist.

4.4.3 Pflasterbeläge mit aufgeweiteten Sickerfugen

Die Laborversuche umfassten verschiedene Versuchsserien an zwei Pflasterbelägen, die mit deutlich breiteren, 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. Sowohl für die Bettung als auch zur

¹⁸² 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.

Verfüllung der Fugen wurde jeweils ein Splitt mit Körnung 2/5 mm verwendet. Im Rahmen der Versuchsserien 1 und 4 war der Pflasterbelag mit 10 mm Fugenweite auf einer 40 cm mächtigen Tragschicht aus Schotter (Körnung 0/45 mm) angeordnet, während im Rahmen der Versuchsserie 5 die beiden Beläge mit Fugenweiten von 7 mm und 10 mm jeweils in singulärer Anordnung (Pflasterdecke auf Bettungsschicht) untersucht wurden. Der prinzipielle Aufbau erfolgte dabei jeweils analog der zuvor geschilderten Pflaster- und Plattenbeläge (vgl. Abbildung 58 und Abbildung A - 42).



Abbildung 74: Flächenbeläge aus Betonsteinen mit splittverfüllten Sickerfugen

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.

Zur Nachbildung verschiedener Kolmationsgrade wurden die Beläge mit ganz unterschiedlichen Mengen und in unterschiedlichen Abstufungen mit Quarzmehl beaufschlagt (maximal 8600 g/m²; siehe auch Versuchsmatrices im Anhang). Trotz der teilweise extrem großen Mengen an Quarzmehl, die auf die Flächen aufgestreut und anschließend in die Fugen gespült wurden, entstanden keine nennenswerten Oberflächenabflüsse. Im Detail sind die Ergebnisse daher weniger interessant. Aus diesem Grund werden nachfolgend nur einige wenige Ergebnisse exemplarisch dargestellt und diskutiert.

So zeigt Abbildung 75 ausgewählte Messergebnisse für den Belag mit einer Fugenweite von 10 mm (Fugenanteil rd. 14%), der auf einer 40 cm mächtigen Schottertragschicht angeordnet war. Die Oberflächenneigung betrug 2,5%. Zur Nachbildung der Verstopfung der Fugen durch eingespülte Feinpartikel waren bei diesem Versuch insgesamt 4000 g Quarzmehl auf die Fläche aufgetragen und während der Vorberegnung – wenn auch nicht ganz vollständig – in die Fugen geschwemmt worden.



Abbildung 75: Messergebnisse eines Pflasterbelages mit splittverfüllter Sickerfuge von 10 mm Breite bei einer Quarzmehlmenge 4000 g/m² (Gefälle 2,5%, Lagerung über 40 cm mächtiger Schottertragschicht)

Trotz der großen Menge an Quarzmehl konnte keine geschlossene Feinpartikelschicht auf dem Fugensplitt erzielt werden. Es zeigte sich vielmehr, dass ein beträchtlicher Anteil des Quarzmehls durch das grobe Fugenmaterial in den Oberbau der Pflasterkonstruktion getragen wird. Dies deutet darauf hin, dass Flächenbeläge, bei denen die Versickerung über sehr grobkörniges Fugenmaterial erreicht wird, prinzipiell deutlich weniger empfindlich gegen Kolmation sind als Pflasterbeläge mit Fugenfüllungen aus Sand bei zugleich meist deutlich schmäleren Fugen. Dies erklärt auch die vielfach sehr hohen Versickerungsleistungen, die an Bestandsflächen angetroffen wurden (siehe Kapitel 4.1 bis 4.3).

Die Wasserdurchlässigkeit der Splittfüllung in den Fugen ist derart groß, dass selbst hohe Beregnungsintensitäten wie die hier gezeigte Intensität von 300 /(s·ha) problemlos und vollständig durch den Oberbau versickern kann. Dabei setzte bereits nach nur 15 Minuten nach Start der Beregnung die Exfiltration 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 stationärer Strömungszustand stellte sich bereits 35 Minuten nach Einsetzen der Beregnung ein.

Die zugehörigen Wassergehalte in verschiedenen Tragschichthorizonten sind ebenfalls in Abbildung 75 dargestellt. Sie bewegen sich trotz der intensiven Durchströmung der Tragschicht auf recht geringem Niveau und steigen nicht über 18%. Auch sie spiegeln das rasche Vorrücken der Infiltrationsfront sehr gut wider.

Nach Ende der Beregnung sanken die Wassergehalte wie auch der Sickerabfluss zunächst relativ rasch, dann aber in zunehmend geringerem Maße wieder ab. Die schwerkraftbedingte Entwässerung erfolgt dabei grundsätzlich langsamer als die Wasseraufnahme infolge der intensitätsstarken Beregnung. So verebbte im dargestellten Beispiel der Sickerabfluss nach rd. acht Stunden. Die Wassergehalte in der Tragschicht hatten nach 24 Stunden wieder ihr Ausgangsniveau erreicht.

Wie in nachstehender Abbildung 76 dokumentiert ergaben sich für die weiteren Beregnungsversuche an diesem Belag bei den unterschiedlichen Quarzmehlbeaufschlagungen von bis zu 8600 g/m² nahezu identische Ergebnisse.





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.

Die hohe Übereinstimmung 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 ausgeprägte Kolmation des Pflasterbelages erzielt werden konnte. Dabei ist nicht davon auszugehen, dass ein Pflasterbelag mit splittverfüllten Fugen im Gebrauchszustand stets eine derart hohe Infiltrationskapazität dauerhaft aufrecht erhalten kann.

Zwar hat sich sowohl in der statistischen Analyse des Versickerungsvermögens in Kapitel 4.2 als in der Auswertung der Abflussmessungen in Kapitel 4.3 ergeben, das Beläge aus Sickerfugenpflaster auch nach mehrjähriger Nutzung vielfach noch ein sehr hohes Versickerungsvermögen mit Infiltrationsleistungen von über 500 l/(s·ha) erreichen. Ebenso wurde jedoch auch Pflasterflächen angetroffen, bei denen infolge von Kolmationserscheinungen die Versickerungsleistungen mit Werten von unter 100 l/(s·ha) deutlich niedriger lagen.

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.¹⁸³ Oberflächenabflüsse traten auch hier nicht auf. 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 belegen, 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. Ob der Deckbelag auch hier ein insgesamt geringeres Versickerungsvermögen als die mit der vollen Querschnittsfläche wirksame Tragschicht aufweist, kann dagegen nicht beurteilt werden. Hierzu hätten noch höhere Beregnungsintensitäten gefahren werden müssen als dies mit der Lysimeteranlage möglich ist.

¹⁸³ Dies ist in Abbildung A - 49 im Anhang veranschaulicht.

4.4.4 Poröse Pflasterbeläge aus haufwerksporigen Betonsteinen

Beläge aus Porenbetonpflaster wurden im Rahmen der beiden Versuchsserien 5 und 6 untersucht (siehe Versuchsmatrices im Anhang). Betrachtet wurden dabei Porenbetonsteine zweier unterschiedlicher Hersteller (Klostermann, behaton). Einer dieser beiden Beläge war auch Bestandteil der In-situ-Messungen mittels Tropfinfiltrometer 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 (Fischgrät- bzw. Kreuzverband). 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 77: 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 77). 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. Dennoch scheint die angewandte Methodik insbesondere zur Nachbildung von Kolmationserschienungen bei grobkörnigen Fugenmaterialien noch nicht ganz ausgereift. Anstelle der ausschließlichen Verwendung von sehr feinkörnigem Quarzmehl wäre hier die Verwendung weiter gestufter Korngemische vermutlich besser geeignet. Damit könnte eine stufenweise Verlegung des Fugenraumes zunächst mit gröberen und nachfolgend mit feineren Partikeln erzielt werden, so wie sie sich unter realen Nutzungsbedingungen auch bei diesen Belagstypen vollziehen kann. Eine Variation der Methodik innerhalb des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde jedoch als wenig sinnvoll erachtet und würde ohnehin weiterer gezielter Untersuchungen bedürfen. Auch wenn in den Laborversuchen keine ausgeprägten Kolmationsgrade betrachtet werden konnten, repräsentieren die Ergebnisse dennoch das Versickerungsvermögen von Porenbetonflächen, wie es vielfach an Bestandsflächen anzutreffen ist (vgl. Häufigkeitsverteilung in Abbildung 39).

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 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. Dies haben auch die Abflussmessungen am Versuchsfeld in Lingen gezeigt. 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 Oberflächenabflusses vermutlich deutlich keiner als bei gefügedichten Betonsteinen.

4.4.5 Fazit der Laborversuche

Im Rahmen der umfangreichen Laborversuche an der Lysimeteranlage am IKT wurde das Versickerungsphänomen zahlreicher Pflasterbeläge bei verschiedensten Beregnungslastfällen und unter diversen Randbedingungen eingehend untersucht. Im Fokus der rd. 140 Beregnungsversuche standen dabei gering bis mäßig durchlässige Flächenbeläge aus konventionellen Pflasterbauweisen. Die Versuche lieferten Wasserhaushaltsbilanzen einschließlich Wassergehalten in verschiedenen Tragschichthorizonten. Die Messergebnisse charakterisieren dabei insbesondere das Versickerungsverhalten der untersuchten Pflasterbauweisen und quantifizieren ihr Versickerungsvermögen in Abhängigkeit von verschiedenen äußeren und baulichen Einflussfaktoren.

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 bewährt und zu belastbaren und aussagekräftigen Messergebnissen geführt. Lediglich für die besonders stark durchlässigen Pflasterbeläge konnte mit dem aufgebrachten Quarzmehl keine sehr ausgeprägte Kolmation erzielt werden.

Die Lysimeterversuche lieferten insgesamt wertvolle Erkenntnisse über das Versickerungsvermögen der Pflastertypen und über die Prozesse, die auf bzw. in der Pflasterkonstruktion ablaufen. Zahlreiche Beobachtungen aus den Messungen an Bestandsflächen konnten anhand der Laborversuche bestätigt und näher analysiert werden. Dies gilt insbesondere für die bislang in der Fachliteratur nicht dokumentierte Abhängigkeit des Versickerungsvermögens von der Niederschlagsintensität, die im Rahmen der Laborversuche eindeutig nachgewiesen und ihrer Größenordnung benannt werden konnte. Hier konnte zudem gezeigt werden, dass sich das Versickerungsvermögen bei zeitlich variabler Niederschlagsintensität auch abrupt mit der Niederschlagsbelastung ändert.

Darüber hinaus konnte anhand der Laborversuche der Einfluss weiterer Randbedingungen auf das Versickerungsvermögen systematisch untersucht und quantifiziert werden. Der Eintrag von Feinpartikeln in den Fugenraum wurde als die wesentliche, die Versickerungskapazität bestimmende Einflussgröße identifiziert und die Auswirkung unterschiedlicher Feinpartikelmengen auf das Versickerungsvermögen dokumentiert. Für konventionelle Beläge aus fugenarmem Funktionspflaster wurde zudem der Einfluss des Oberflächengefälles auf die Versickerungsleistung benannt.

Ferner konnte gezeigt werden, dass die Infiltration von Regenwasser in die Deckschicht eines Pflasterbelages meist zu einer lediglich mäßigen Aufsättigung der Tragschicht führt. Die Tragschicht verfügt über ein enormes Speichervolumen und beeinträchtigt den Infiltrationsvorgang in der Regel nicht, selbst wenn die Pflasterkonstruktion auf einer gering durchlässigen Unterlage liegt.

Dagegen konnte anhand der Lysimeterversuche kein nennenswerter Einfluss der Vorbefeuchtung bzw. der Trockenperiode vor Regenbeginn auf die Versickerungsleistung festgestellt werden. Die Laboruntersuchung konnten diesbezüglich ebenso wenige Antworten liefern wie die zuvor erörterten Feldmessungen an Bestandsflächen. Darüber hinaus gewähren die Lysimeterversuche über die TDR-Sonden in der Tragschicht lediglich punktuelle Informationen über die bodenhydraulischen Zustände innerhalb des Pflasteraufbaus. Über die Wassergehalte und Saugspannungen in der Bettungsschicht und insbesondere im für den Versickerungsvorgang besonders maßgeblichen Fugenraum vermögen die Versuche jedoch keine Informationen zu liefern. Dies war letztlich einer der Gründe, das numerische Strömungsmodell HYDRUS-2D auf den Versuchsaufbau der Lysimeteranlage anzuwenden. Die Ergebnisse dieser Simulationsstudie werden im nachfolgenden Kapitel diskutiert.
4.5 Ergebnisse der numerischen Simulation der Strömungsvorgänge im Pflasteraufbau

Mit Hilfe des numerischen Simulationswerkzeuges HYDRUS-2D wurden die Strömungsprozesse im Aufbau verschiedener Pflasterkonstruktionen untersucht. Hierzu wurde in einem ersten Schritt der Lysimeteraufbau der Laborversuche für drei exemplarische Pflasterbauweisen im Modell nachgebildet und anhand der Messergebnisse kalibriert (vgl. Kapitel 3.6). Dieser Arbeitsschritt dient in erster Linie der Verifizierung der Messergebnisse, der Illustration der Strömungsverhältnisse im Pflasteraufbau und damit dem besseren Verständnis der Strömungsvorgänge, die innerhalb der Konstruktion ablaufen.

In einem zweiten Schritt wurden verschiedene klimatische und bauliche Randbedingungen systematisch variiert und der Einfluss der einzelnen Randbedingungen auf das Versickerungsvermögen analysiert. Dieser Untersuchungsschritt zielt darauf ab, die Ergebnisse aus den Labor- und In-Situ-Messungen abzusichern und zu vertiefen. Die Anwendung des Strömungsmodells dient vor allem dazu, die allein auf die Bodenhydraulik zurück zu führenden Einflüsse der einzelnen Randbedingungen zu identifizieren. Die Ergebnisse der Vergleichssimulationen ergänzen hierbei insbesondere die Bewertung der auf dem Versuchfeld in Lingen unter realen Nutzungsbedingungen gewonnen Messdaten (Kapitel 4.3).

4.5.1 Erstellung und Kalibrierung der Modelle

Im Rahmen der Simulationsstudie wurden drei unterschiedliche Pflasterbauweisen betrachtet: ein fugenarmer Plattenbelag aus Kleinformatplatten mit 30 cm Kantenlänge (Fugenanteil 1,8%), ein konventioneller fugenarmer Pflasterbelag (Fugenanteil 4,5%) sowie ein Sickerfugenpflaster mit aufgeweiteten Fugen (Fugenanteil 14%).

Im Modell wurde jeweils ein Pflastersegment von einem Meter Breite analog dem Aufbau im Lysimeter nachgebildet. Das Rasternetz zur geometrischen Abgrenzung der finiten Elemente besteht aus einem Grundraster mit einer Maschenweite von 2 cm x 2 cm, das im Bereich des Deckbelages und der Bettung vertikal auf 1 cm und im Bereich der Fugen horizontal auf 0,2 cm verfeinert ist. Die verschiedenen Elemente des Pflasteraufbaus (Steine, Fugenfüllung, Bettung, Tragschicht und ggf. Untergrund) werden im Modell durch Zuordnung der entsprechenden Bodenparameter nach van Genuchten definiert. Die Fugenfüllung wurde hierbei jeweils vereinfachend als homogenes Material abgebildet. Auf eine detaillierte Nachbildung der Anlagerung von Feinpartikeln in den ersten Zentimetern des Fugenraumes wurde verzichtet, da sie dem Genauigkeitsanspruch der vorliegenden Modellanwendung nicht angemessen erscheint. Abbildung 78 zeigt exemplarisch das Grundmodell des konventionellen Pflasterbelages mit der geometrischen Materialverteilung und dem FE-Gitter.



Abbildung 78: Materialverteilung und Rasternetz finiter Elemente eines Pflasteraufbaus aus fugenarmem Verbundpflaster (Vertikalschnitt)

Für den Verbundpflasterbelag sind in Tabelle 15 die im Zuge der Kalibrierung gewählten Modellparameter der einzelnen Materialien der Pflasterkonstruktion aufgeführt. Die Parameterwerte zur Simulation des Plattenbelages und des Sickerfugenpflasters sind im Anhang enthalten.

Material	Θ _R [cm³/cm³]	⊖s [cm³/cm³]	α [-]	n [-]	K s [cm/min]
Fugensand (mäßige Kolmation)	0,05	0,48	0,05	2,0	16,0
Fugensand (ausgeprägte Kolmation)	0,05	0,52	0,03	1,3	8,0
Bettungsmaterial (Splitt 2/5 mm)	0,05	0,45	0,55	5,5	6,0
Tragschichtmaterial (Schotter 0/45 mm)	0,05	0,37	0,55	6,5	20,0
Pflasterstein	0,05	0,08	0,01	2,0	0,002

Tabelle 15:Modellparameter nach van Genuchten zur numerischen Simulation einesPflasteraufbaus aus fugenarmem Verbundpflaster

Für die zwei betrachteten Kolmationgrade, die der Auftragung von 200 g und 400 g Quarzmehl im Rahmen der Laborversuche entsprechen, wurden entsprechend unterschiedliche Parameterwerte für das Fugenmaterial gewählt. Die Parameter der übrigen Materialen blieben bei der Betrachtung unterschiedlicher Kolmationsgrade unverändert. Den eigentlich undurchlässigen Pflastersteinen und Platten wurde jeweils eine geringe hydraulische Leitfähigkeit zugesprochen. Zum einen erfordert dies das Simulationsprogramm; zum zweiten wird hierdurch ein horizontaler Zustrom aus den lateral zur Schnittebene an die Pflastersteine angrenzenden Fugenräumen näherungsweise erfasst.

Die Kalibrierung der Modelle für die drei betrachteten Pflasteraufbauten erbrachte eine ausgesprochen zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den simulierten Wasserströmen (siehe Anhang: Abbildung A - 51 bis Abbildung A - 54). Die aus der jeweils zu Grunde gelegten Regenintensität resultierenden Infiltrations- und Exfiltrationsraten werden im Modell gut bis sehr gut abgebildet. Die rechnerischen Wassergehalte spiegeln die Verläufe der punktuell gemessenen Wassergehalte in der Tragschicht gut wider. Die Modellanwendung liefert keinerlei Hinweise auf unplausible Messwerte sondern verifiziert diese bei plausiblen Parameterwerten.

4.5.2 Wasserhaushalt und Strömungsvorgänge im Pflasteraufbau

Das rechnerische Versickerungsverhalten eines Pflasteraufbaus wird nachfolgend am Beispiel der Simulationsergebnisse für einen fugenarmen Verbundpflasterbelag erörtert. Abbildung 79 zeigt die Ganglinien der Infiltrationsrate, des Oberflächenabflusses und der Exfiltrationsrate bei 30-minütiger Beregnung mit konstanter Intensität von 200 I/(s·ha). Der Belag weist einen mäßigen Kolmationsgrad und ein entsprechend hohes Versickerungsvermögen auf.



Abbildung 79: Simulationsergebnisse für einen mäßig kolmatierten Pflasteraufbau aus fugenarmem Verbundpflaster bei 30-minütiger Beregnung mit 200 l/(s·ha)

Die Versickerungsrate nimmt im dargestellten Beispiel im Laufe der ersten 5-10 Minuten von knapp 200 l/(s·ha) auf rd. 130 l/(s·ha) ab und verbleibt bis zum Regenende konstant. Damit liefert auch das Modell den prinzipiell an Pflasterflächen zu beobachtenden zeitlichen Verlauf des Versickerungsvermögens. Die Exfiltration aus der Tragschicht setzt im dargestellten Beispiel nach rd. 25 Minuten ein. Diese Zeit entspricht in etwa der Dauer, die das an der Oberkante in den Fugenraum infiltrierte Wasser benötigt, um durch Fugenraum, Bettungs- und Tragschicht zu strömen. Der Wassertransport durch die einzelnen Schichten hindurch erfordert dabei jeweils einen ausreichenden Wassergehalt mit entsprechend geringen Saugspannungen. Dieser Sachverhalt ist in den zeitlich gestaffelten Wassergehaltsprofilen in Abbildung 80 veranschaulicht.

Die Grafiken zeigen die Wassergehaltsverteilung im Pflasteraufbau zu verschiedenen Zeitpunkten während der Beregnung. Mit einsetzender Beregnung steigen die Wassergehalte im Fugenmaterial sehr rasch an und erreichen aufgrund der hohen Beregnungsintensität nach 5-10 Minuten nahezu den Sättigungswassergehalt von hier 48%. Zu diesem Zeitpunkt sind insbesondere die Grobporen vollständig mit Wasser gefüllt und die Infiltrationsrate pendelt sich auf dem Niveau der hydraulischen Leitfähigkeit des Fugenmaterials ein.



Abbildung 80: Wassergehalt in einem mäßig kolmatierten Pflasteraufbau aus fugenarmem Verbundpflaster während einer 30-minütigen Beregnung mit 200 l/(s·ha)

Durch die anhaltende Wasserzufuhr wird nun Wasser aus dem Fugenraum in die Pflasterbettung abgegeben. Dabei steigen die Wassergehalte unmittelbar unterhalb der Fugen weitaus stärker an als unterhalb der Steine. Zur Weitergabe des zuströmenden Wassers an die Tragschicht sind in dem grobkörnigen Bettungssplitt weitaus geringere Wassergehalte von lediglich 15%-25% erforderlich.

Die Tragschicht ist ebenso wie die Bettungsschicht sehr ungleichmäßig durchströmt. In den Bereichen unterhalb der Fugen werden höhere Wassergehalte erreicht als in Bereichen, die unterhalb der Steine liegen. Die Wassergehalte nehmen dabei recht geringe Werte von in der Regel unter 15% ein.

Die Modellanwendung bestätigt erwartungsgemäß die aus den Laborversuchen abgeleiteten Erkenntnisse zum allgemeinen Versickerungsvorgang sowie zu den bodenhydraulischen Verhältnissen in der Tragschicht (vgl. Kapitel 4.4.1). Darüber hinaus liefert sie eine räumlich deutlich schärfere Illustration der Wassergehalte im gesamten Höhenprofil des Pflasteraufbaus. Insbesondere aber liefert sie Informationen über die hydraulischen Zustände im Fugenraum und in der Bettungsschicht, für die bislang keinerlei Messwerte vorlagen.

Ganz analoge Sachverhalte zeigen sich in den Simulationen des Plattenbelages und des Sickerfugenpflasters, wobei sich die drei betrachteten Belagsarten hinsichtlich ihres Versickerungsvermögens und der daraus resultierenden hydraulischen Zustände im Oberbau deutlich unterscheiden. Abbildung 81 zeigt den Aufbau des Plattenbelages und das Wassergehaltsprofil zu verschiedenen Zeitpunkten während einer zweistündigen Beregnung mit einer Intensität von 100 l/(s·ha). In Abbildung 82 sind die zeitlich gestaffelten Wassergehaltsprofile für einen Belag aus Sickerfugenpflaster bei einer ebenfalls zweistündigen Beregnung jedoch bei einer höheren Beregnungsintensität von 200 l/(s·ha) dargestellt.



Abbildung 81: Aufbau und Wassergehaltsprofil eines Plattenbelages bei zweistündiger Beregnung mit 100 l/(s·ha)



Abbildung 82: Aufbau und Wassergehaltsprofil eines Sickerfugenpflasters bei zweistündiger Beregnung mit 200 l/(s·ha)

Für den Plattenbelag übersteigt die Beregnungsintensität das Versickerungsvermögen recht deutlich und die Wassergehalte im Fugenraum erreichen rasch nach Regenbeginn nahezu volle Sättigung. Die infiltrierende Wassermenge ist jedoch aufgrund des geringen Fugenanteils vergleichsweise gering, so dass sowohl in der Bettungs- als auch in der Tragschicht nur eine geringfügige Aufsättigung der Porenräume erfolgt. Die volumetrischen Wassergehalte verbleiben überwiegend unter 15%. Ebenso wie beim dem konventionellen Pflasterbelag werden Bettungs- und Tragschicht ungleichmäßig durchströmt.

Der Belag aus Sickerfugenpflaster weist aufgrund des hohen Fugenanteils und der grobkörnigen Fugenfüllung aus Splitt ein deutlich höheres Versickerungsvermögen auf. Die aufgebrachte Beregnungsintensität von 200 l/(s·ha) kann vollständig in den Pflasteraufbau infiltrieren. Der Wassergehalt im Fugenraum steigt dabei nur moderat auf rd. 20% an. Trotz der vergleichsweise großen Wasserzufuhr verbleiben die Wassergehalte in der Bettungsschicht und in der Tragschicht wiederum recht gering und verdeutlichen damit ihre im Vergleich zum Deckbelag deutlich höhere hydraulische Leistungsfähigkeit.

4.5.3 Einfluss der Niederschlagscharakteristik auf die Strömungsprozesse im Pflasteraufbau

Die Auswertung der Abflussmessdaten an dem Versuchsfeld in Lingen hat ebenso wie die Laborversuche gezeigt, dass das Versickerungsvermögen einer Pflasterfläche in hohem Maße von der Regenintensität abhängt. Eine abgesicherte Begründung für dieses erstmalig nachgewiesene Phänomen konnte jedoch weder auf der Basis der In-Situ-Messungen noch auf der Basis der Lysimeterversuche geliefert werden. Bislang kann lediglich vermutet werden, dass die Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit der Fugen und/oder die spezifische Bodenhydraulik des inhomogenen Pflasteraufbaus für das Phänomen verantwortlich sein können. Aus diesem Grunde wurde die Korrelation zwischen dem Versickerungsvermögen und der Regenintensität anhand von bodenhydraulischen Vergleichssimulationen weiter untersucht.

Hierzu wurden für die betrachteten Belagstypen Simulationen mit zahlreichen konstanten Beregnungsintensitäten zwischen 25 I/(s·ha) und 1.000 I/(s·ha) bei verschiedenen Beregnungsdauern zwischen 30 und 120 Minuten sowie für einen vereinfachten Euler-Modellregen mit variabler Regenintensität durchgeführt. Die Infiltrationsraten jeweils nach 30-minütger Beregnung sind in Abhängigkeit von der jeweiligen Regenintensität für den Verbundpflasterbelag sowie den Plattenbelag in Abbildung 83 dargestellt.

Auch bei der numerischen Simulation der Strömungsprozesse zeigt sich das Phänomen der mit der Regenintensität ansteigenden Versickerungsleistung. Für den Pflasterbelag ergibt sich bspw. bei einer konstanten Beregnung von 100 l/(s·ha) bei mäßiger Kolmation eine Versickerungsrate von rd. 85 l/(s·ha); bei ausgeprägter Kolmation eine Versickerungsrate von rd. 55 l/(s·ha). Für eine Regenspende von 500 l/(s·ha) ergeben sich für die beiden Kolmationsgrade mit Versickerungsleistungen von 260 l/(s·ha) bzw. 115 l/(s·ha) deutlich höhere Werte. Die Zunahme des Versickerungsvermögens mit der Regenintensität erfolgt für den Pflasterbelag jedoch nicht ganz gleichförmig, während für den Plattenbelag eine nahezu lineare Zunahme der Versickerungsleistung zu verzeichnen ist.



Abbildung 83: Korrelation zwischen Regenintensität und Infiltrationsrate für Pflasterungen aus Verbundpflaster und Kleinformatplatten (Simulation HYD-RUS-2D)

Bei Regen variabler Intensitäten ergeben sich im Modell, wie auch bereits im Rahmen der Lysimeterversuche beobachtet¹⁸⁴, bei schlagartiger Zunahme der Regenintensität ebenso rasch steigende Versickerungsraten. Die Simulationsergebnisse für ein solches Szenario zeigt nachstehende Abbildung 84.¹⁸⁵

Da im Modell durchweg homogene Materialien zu Grunde gelegt sind, kann das Phänomen nicht allein durch ein über die Fläche variierendes Versickerungsvermögen der Fugen hervorgerufen werden, sondern muss auch in der spezifischen Bodenhydraulik von Pflasterkonstruktionen begründet sein. Dies ist insofern überraschend, als bei natürlichen Böden auch bei geschichtetem Aufbau dieses Phänomen nicht zu beobachten ist, wie auch ergänzende Vergleichssimulationen¹⁸⁶ ergeben haben.

¹⁸⁴ siehe Abbildung 64

¹⁸⁵ siehe auch zugehörige Wassergehalts- und Saugspannungsverläufe in Abbildung A - 56 im Anhang

¹⁸⁶ siehe Abbildung A - 55 im Anhang



Zur weiteren Analyse des Phänomens wurden zusätzliche Simulationen für den in Abbildung 85 schematisch dargestellten Fugenraum eines Pflasterbelages bei extrem hoher räumlicher Diskretisierung durchgeführt. Grundlage des Modells bildet hier ein sehr feines Rasternetz mit einer Maschenweite von 1,0 x 0,5 mm.



Abbildung 85: Querschnittssegment des Pflasteraufbaus zur Detailanalyse des Versickerungsprozesses im Fugenraum

Für eine 30-minütige Beregnung mit einer konstanten Intensität von 200 l/(s·ha) ergibt sich in dem Pflastersegment das in Abbildung 86 gezeigte Wassergehaltsprofil. Innerhalb von wenigen Minuten steigt der Wassergehalt in der Fuge stark an, erreicht aber keine vollständige Sättigung. Die Feuchtefront wandert dabei sehr rasch von der Oberkante zur Unterkante des Fugenraums voran. Nach knapp fünf Minuten haben sich in der Fuge homogene Strömungsverhältnisse ausgebildet, die aufgrund der gleichförmigen Wasserzufuhr bis zum Ende der Beregnung konstant bleiben. Die Feuchtefront breitet sich dagegen in der Bettungsschicht und nachfolgend in der Tragschicht weiter aus (s.o.). Unmittelbar nach Ende der Beregnung beginnen die Poren des Fugenmaterials sich zu entleeren, indem das Wasser nach unten in die Pflasterbettung abgegeben wird. Bereits eine halbe Stunde nach Regenende hat sich der volumetrische Wassergehalt im Fugenraum in etwa halbiert. Nach rd. sechs Stunden liegt an der Oberkante des Fugenraumes nur noch ein Wassergehalt von 10%-15% vor.



Abbildung 86: Wassergehaltsprofil im Fugenraum eines Pflasterbelages mit schmaler Fuge bei 30-minütiger Beregnung mit 200 l/(s·ha)

Bei der Gegenüberstellung der Wassergehalts- und Saugspannungsverläufe im Fugenraum zeigt sich, dass sich mit zunehmender Intensität der Beregnung zunehmende Wassergehalte und abnehmende Saugspannungen einstellen. Für ausgewählte Beregnungsintensitäten zwischen 75 l/(s·ha) und 325 l/(s·ha) ergeben sich beispielsweise für einen Beobachtungspunkt einen Zentimeter unterhalb der Fugenoberkante die in Abbildung 87 dargestellten Ganglinien des Wassergehaltes und der Wasserspannung.

Zwar ist bei allen Beregnungsintensitäten der volumetrische Wassergehalt sehr hoch; eine vollständige Sättigung des Fugenraumes wird jedoch bei keinem der betrachteten Lastfälle erreicht. Mit den geringfügigen Differenzen zwischen den Wassergehalten gehen entsprechende Differenzen zwischen den Saugspannungen einher. Nahe dem Sättigungszustand nimmt die hydraulische Leitfähigkeit grundsätzlich mit weiter ansteigendem Wassergehalt bzw. weiter abnehmender Saugspannung exponential zu (vgl. Abbildung A - 50). Aus den geringfügigen Differenzen der Wassergehalte und Saugspannungen bei unterschiedlicher Regenintensität resultieren daher nennenswerte Unterschiede in der hydraulischen Leitfähigkeit. Mit zunehmender Wasserverfügbarkeit an der Oberfläche nähert sich der Wassergehalt im Fugenbereich zunehmend dem Sättigungszustand an. Infolge der hierbei steigenden hydraulischen Leitfähigkeit des Fugenmaterials nimmt auch das Versickerungsvermögen mit steigender Regenintensität zu.



Abbildung 87: Wassergehalts- und Saugspannungsverlauf im Fugenraum eines fugenarmen Verbundpflaster in Abhängigkeit von der Regenintensität (1 cm unterhalb der Fugenoberkante)

Damit kann das oben beschriebene Phänomen weiter eingegrenzt werden. Es bleibt jedoch offen, welcher Umstand die mit der Regenintensität steigenden Wassergehalte und -leitfähigkeiten letztlich bedingt und aus welchem Grund dieses Phänomen bei natürlichen Böden nicht anzutreffen ist (vgl. Abbildung A -55). In der Fachliteratur finden sich hierzu keine Anhaltspunkte. Zur weiter gehenden Analyse des Phänomens sind jedoch ausgesprochen detaillierte bodenhydraulische Untersuchungen erforderlich, die sowohl umfangreiche Analysen der Materialeigenschaften als auch hochauflösende messtechnische Erfassungen von Wassergehalten, Saugspannungen und Potentialdifferenzen während Beregnungsphasen umfasst.

Ebenfalls unklar ist bislang der Zusammenhang zwischen dem Versickerungsvermögen und der Vorbefeuchtung einer Pflasterfläche. Weder im Rahmen der In-Situ-Messungen noch im Rahmen der Lysimeterversuche im Labor zeigte sich eine eindeutige und quantifizierbare Korrelation. Daher wurden für den konventionellen Pflasterbelag weitere Vergleichssimulationen für eine intervallartige Beregnung mit unterschiedlich langen Trockenperioden durchgeführt. Zwischen den 30-minütigen Beregnungsintervallen mit Intensitäten von 150 l/(s·ha) liegen Trockenphasen von 15 Minuten bis zu 48 Stunden. Trotz der unterschiedlichen Anfangswassergehalte im Fugenraum ergaben sich bei allen Beregnungsintervallen innerhalb von wenigen Minuten nach Einsetzen der Beregnung nahezu identische Infiltrationsraten (Abbildung 88).





Daraus wird geschlossen, dass der Sättigungsgrad des Fugenmaterials das Versickerungsvermögen nur in eingeschränktem Maße beeinflusst. Längere Trockenperioden und entsprechend geringere Wassergehalte im Fugenraum führen in erster Linie zu höheren Anfangsinfiltrationsraten, die auf das Füllen der Grobporen zurück zu führen sind und nicht mit der hydraulischen Leitfähigkeit des Fugenmaterials gleichzusetzen sind. Inwieweit zusätzliche Phänomene wie beispielsweise das Feuchte bedingte Quellen organischer Substanz im Fugenraum die hydraulische Leistungsfähigkeit beeinträchtigen können, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden. Der Einfluss der Vorgeschichte eines Regenereignisses scheint jedoch im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren von eher untergeordneter Bedeutung zu sein.

4.5.4 Einfluss baulicher Randbedingungen auf die Strömungsprozesse im Pflasteraufbau

In Ergänzung zur Bewertung verschiedener baulicher Gegebenheiten auf das Versickerungsvermögen, wie sie auf Grundlage der Messdaten des Versuchsfeldes in Lingen in Kapitel 4.2.2 erörtert sind, wurden Vergleichssimulation bei variierenden baulichen Randbedingungen vollzogen. Hierbei wurden systematisch veränderte bodenhydraulische Materialeigenschaften für die Bettungsschicht, die Tragschicht sowie den anstehenden Untergrund bei diversen Niederschlagsbelastungen betrachtet.

Für die beiden fugenarmen Beläge aus Kleinformatplatten und aus Verbundpflaster wurden fünf verschiedene Bettungsmaterialien untersucht. Die hydraulischen Leitfähigkeiten und die Saugspannungen der Bettungsmaterialien sind in Abhängigkeit vom volumetrischen Wassergehalt in Abbildung 89 dargestellt. Die zu Grund gelegten Modellparameter sind im Anhang (Tabelle A - 12) aufgeführt.



Abbildung 89: Hydraulische Leitfähigkeiten und Saugspannungen der betrachteten Bettungsmaterialien in Abhängigkeit vom volumetrischen Wassergehalt

Die betrachteten Bettungsmaterialien zeichnen sich durch eine fortlaufend abnehmende hydraulische Leitfähigkeit aus. Zwischen der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten des Bettungsmaterials B01 und des Materials B04 liegen fast zwei Zehnerpotenzen. Die für die verschiedenen Bettungsmaterialien bei einem fugenarmen Verbundpflasterbelag mäßigen Kolmationgrades resultierenden Infiltrationsraten zeigt Abbildung 90 für zwei unterschiedliche Niederschlagsbelastungen.

Das Diagramm verdeutlicht den insgesamt mäßigen, aber dennoch merklichen Einfluss der Bettungsschicht auf das Versickerungsvermögen der Pflasterkonstruktion. Die Infiltrationsraten differieren um maximal 15%. Allerdings zeigt sich auch, dass Bettungsmaterialien mit geringerer hydraulischer Leitfähigkeit nicht zwangsläufig zu geringeren Infiltrationsleistungen führen müssen. Die höchsten Versickerungsraten werden vom Bettungsmaterial B03 erzielt. Für das durchlässigere Bettungsmaterial B01 ergeben sich in der Simulation geringere Versickerungsraten als für das geringer durchlässige Material B05. Dies kann u.a. dadurch bedingt sein, das sich je nach Materialeigenschaften die Feuchtefront horizontal in unterschiedlichem Ausmaß von den Bereichen unmittelbar unter den Fugen zu von Pflastersteinen überdeckten Bereichen ausbreitet. Für den Plattenbelag ergeben sich ganz ähnliche Ergebnisse bei entsprechend niedrigeren Versickerleistungen. Eine Darstellung der Ergebnisse findet sich im Anhang.



Abbildung 90: Infiltrationsraten eines fugenarmen Verbundpflasterbelages mäßigen Kolmationsgrades bei unterschiedlichen Bettungsmaterialien und Niederschlagsbelastungen

Analoge Vergleichssimulationen wurden für zehn unterschiedliche Tragschichtmaterialien durchgeführt, deren bodenhydraulischen Eigenschaften in Abbildung 91 dargestellt sind. Die zu Grund gelegten Modellparameter sind wiederum im Anhang zu finden (Tabelle A - 13).



Abbildung 91: Hydraulische Leitfähigkeiten und Saugspannungen der betrachteten Tragschichtmaterialien in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Die Tragschicht bzw. die Eigenschaften des Tragschichtmaterials beeinflussen das Versickerungsvermögen nur marginal. Trotz der teilweise ganz beträchtlichen Unterschiede zwischen den hydraulischen Leitfähigkeiten der betrachteten Materialien resultieren nur minimale Unterschiede zwischen den rechnerischen Versickerungsraten, wie am Beispiel des fugenarmes Pflasterbelages in Abbildung 92 dokumentiert ist. Lediglich für die Tragschichtvariante T10 mit einer gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit von rd. 2·10⁻⁷ m/s ergibt sich bei einer – fast schon utopischen – Beregnungsintensität von 100 l/(s·ha) über eine Dauer von zwei Stunden ein Einbruch des Versickerungsvermögens nach einer Beregnungsdauer von rd. 90 Minuten.





Damit bestätigt sich einerseits die im Rahmen der Lysimeterversuche festgestellte weitgehende Entkopplung des Infiltrationsprozesses von den hydraulischen Verhältnissen in der Tragschicht. Erst bei einer vollständigen Aufsättigung des Oberbaus reduziert sich das Infiltrationsvermögen in etwa auf die hydraulische Leitfähigkeit der hydraulisch begrenzenden Schicht. Anderseits relativieren die Simulationsergebnisse die hohen Differenzen in den Versickerungsraten, die sich für die Vergleichsflächen unterschiedlichen Tragschichtmaterials auf dem Versuchsfeld in Lingen gezeigt haben (vgl. Abbildung 55). Es wird davon ausgegangen, dass die dort aufgetretenen Differenzen im Versickerungsvermögen nicht unmittelbar auf die bodenhydraulischen Eigenschaften der beiden verwendeten Tragschichtmaterialien zurück zu führen sind, sondern primär andere Ursachen haben, bei denen die Materialeigenschaften aber durchaus eine Rolle spielen können.

Auf dem Versuchsfeld in Lingen ergab sich für Flächenpaare, die sich allein hinsichtlich der Durchlässigkeit des Planums baulich unterscheiden, kein einheitliches Bild der auftretenden Versickerungsleistungen. Bei abgedichtetem Planum zeigten sich im Vergleich zur jeweiligen Bauvariante mit freier Perkolation sowohl erhöhte als auch reduzierte Infiltrationsleistungen. Eine negative Beeinträchtigung des Versickerungsvermögens infolge des nahezu undurchlässigen Untergrundes konnte nicht festgestellt werden. Die differierenden Infiltrationsleistungen wurden – aus Mangel an weiter gehenden Kenntnissen – primär auf die generell nach mehrjähriger Nutzung zu beobachtende kleinräumige Variabilität des Versickerungsvermögens zurück geführt. Im Rahmen der Laborversuche bestätigte sich, dass eine geringe Durchlässigkeit der Pflasterunterlage den Infiltrationsprozess an der Deckschicht in der Regel nicht beeinträchtigt. Zur Unterfütterung dieser Einschätzungen wurden für die drei betrachteten Pflasterarten Strömungssimulationen bei variierender Ausbildung von Tragschicht und Untergrund durchgeführt.

Im Zuge der Vergleichssimulation wurden zehn unterschiedliche Plana mit abnehmenden hydraulischen Leitfähigkeiten betrachtet. Die aus den gewählten Materialeigenschaften resultierenden hydraulischen Leitfähigkeiten und Saugspannungen sind in Abhängigkeit vom volumetrischen Wassergehalt in Abbildung 93 dargestellt.



Abbildung 93: Hydraulische Leitfähigkeiten und Saugspannungen der betrachten Plana in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Simuliert wurden die Strömungsvorgänge bei verschiedenen Niederschlagsbelastungen mir Regenintensitäten von 25 l/(s·ha) bis 400 l/(s·ha) bei Regendauern von 30 Minuten bis zu vier Stunden. Die Vergleichssimulationen umfassen dabei Szenarien mit einer Tragschichtmächtigkeit von 30 cm sowie Szenarien mit einer Tragschichtmächtigkeit von lediglich 15 cm. Die Berechnungsergebnisse für ausgewählten Szenarien und Lastfälle sind in Abbildung 94 und Abbildung 95 dargestellt.

Obgleich zum Teil sehr lang anhaltende Beregnungen mit extremen Intensitäten simuliert wurden und sich die zu Grunde gelegten hydraulischen Leitfähigkeiten der Pflasterunterlage um bis zu sechs Zehnerpotenzen unterscheiden, zeigte sich bei keinem der betrachteten Szenarien eine nennenswerte Beeinträchtigung der Versickerungsleistung. Selbst für einen Sickerfugenbelag auf dünner Tragschicht, bei dem aufgrund seines hohen Versickerungsvermögens eine vergleichsweise große Wassermenge in den Pflasteraufbau eindringt, ergibt sich bei keinem der betrachteten Lastfälle ein Einbruch der Versickerungsleistung. Damit bestätigt sich die weitgehende Entkopplung des Infiltrationsvorganges in den Deckbelag von den hydraulischen Zuständen in der Tragschicht, die auch bei geringer Mächtigkeit ein enormes Speichervolumen zur Verfügung stellt.







Abbildung 95: Infiltrationsraten von Belägen aus Betonplatten und Sickerfugenpflaster bei unterschiedlichen Untergrundverhältnissen und Tragschichtstärken

Eine gering durchlässige Pflasterunterlage hemmt die weitere Perkolation des infiltrierten Wassers in den anstehenden Untergrund und führt zu einem sukzessiven Anstieg der Wassergehalte in der Tragschicht solange die Wasserzufuhr von der Oberfläche anhält. Die Infiltrationsleistung geht jedoch erst dann zurück, wenn aus dem Fugenraum weniger Wasser abgegeben als aufgenommen werden kann.

Die sukzessive Aufsättigung der Tragschicht bei einem Pflasterbelag auf gering durchlässiger Unterlage ist in Abbildung 96 am Beispiel eines mäßig kolmatierten Verbundpflasterbelages auf 15 cm mächtiger Tragschicht bei zweistündiger Beregnung mit einer Intensität von 100 l/(s·ha) visualisiert.



Abbildung 96: Wassergehalt in einem mäßig kolmatierten Pflasteraufbau aus fugenarmem Verbundpflaster mit 15 cm starker Tragschicht auf gering durchlässigem Untergrund bei zweistündiger Beregnung mit 100 l/(s·ha)

Die zeitlich gestaffelten Wassergehaltsprofile zeigen die nur langsam fortschreitende Aufsättigung des Oberbaus. Das in den Pflasteraufbau infiltrierte Wasser wird an der Unterkante der Tragschicht aufgrund des nahezu undurchlässigen Planums zurück gehalten. Die Wassergehalte steigen dadurch an der Unterkante der Tragschicht allmählich bis zur vollen Sättigung an und die Sättigungsfront steigt allmählich nach oben. Dabei ist aufgrund des hohen Porenvolumens des Tragschichtmaterials die Tragschicht erst nach einer Beregnungsdauer von rd. 90 Minuten über die gesamte Höhe vollständig gesättigt. Bevor auch die Bettungsschicht vollständig gesättigt ist endet in dem gezeigten Beispiel die Beregnung.

4.5.5 Fazit der numerischen Simulation der Strömungsvorgänge im Pflasteraufbau

Durch die Anwendung des numerischen Simulationsprogramms HYDRUS-2D auf verschiedene Pflasterkonstruktionen bei wechselnden baulichen Gegebenheiten und Niederschlagsbelastungen konnte das Prozessverständnis zum Versickerungsvorgang auf Pflasterflächen weiter gesteigert werden. Das Modell ist in der Lage, die im Rahmen der Laborversuche gemessenen Volumenströme sachgerecht und mit angemessener Genauigkeit wiederzugeben und ermöglicht dabei eine ausgesprochen hilfreiche Illustration der bodenhydraulischen Zustände innerhalb des Pflastersaufbaus.

Durch vielfältige Vergleichssimulationen konnten die Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Lysimeterversuchen sowie den In-Situ-Messungen abgesichert, vertieft und z.T. auch relativiert werden. So konnte gezeigt werden, dass die bereits zuvor nachgewiesene Korrelation zwischen der Regenintensität und der resultierenden Versickerungsleistung u.a. auf den spezifischen Wasserhaushalt des porösen Feststoffmediums im Fugenraum und die ausgeprägten Wechselwirkungen zwischen der Fest- und Flüssigphase beim Wassertransportvorgang zurückzuführen sind. Ferner bestätigte sich die weitgehende Entkopplung des Infiltrationsprozesses im Fugenraum von den bodenhydraulischen Zuständen in der Bettungs- und vor allem in der Tragschicht. Das Versickerungsvermögen einer Pflasterfläche wird in erster Linie von der hydraulischen Leitfähigkeit des Fugenmaterials in Kombination mit dem versickerungsaktiven Flächenanteil bestimmt. Entsprechend sind die bodenhydraulischen Eigenschaften der Bettungs- und der Tragschicht sowie der Pflasterunterlage von untergeordneter Bedeutung.

4.6 Charakterisierung des Versickerungsverhaltens

4.6.1 Phänomenologische Beschreibung des Versickerungsvorganges

Das Versickerungsverhalten verschiedener Pflasterbauweisen wurde im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit anhand von Messungen an Bestandflächen, Lysimeterversuchen im Labor sowie numerischen Strömungssimulationen eingehend untersucht. Als Synthese aus den einzelnen Untersuchungsschritten soll der Versickerungsvorgang auf Pflasterflächen nachfolgend allgemein charakterisiert werden.

Eine Pflasterfläche weist generell einen schichtweisen Aufbau auf, wobei sich die einzelnen Schichten hinsichtlich ihrer hydraulischen Leistungsfähigkeit erheblich unterscheiden können. Die Tragschicht besteht in der Regel aus sehr grobkörnigen, aber stark verdichteten Mineralstoffgemischen mit Durchlässigkeiten in der Größenordnung von 5·10⁻⁴ m/s bis 5·10⁻⁵ 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 in der Regel deutlich weniger durchlässig als Splitt. Dennoch stellt auch die Pflasterbettung im Regelfall keine hydraulische Barriere für in den Oberbau einsickerndes Wasser dar.

Das Infiltrationsvermögen einer versickerungsfähig ausgebildeten Flächenbefestigung wird primär 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 intensive Nutzung der Fläche bspw. durch Fahrzeuge das (auch 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, 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 Körner und organische Substanzen zusammen mit anthropogen bedingten Stäuben¹⁸⁷ eine Sedimentationsschicht an der Oberkante des Fugenraumes, der zu einer erheblichen Reduktion des Versickerungsvermögens führen kann.

Dieser als Kolmation bezeichnete Prozess kann je nach Standort, Liegezeit 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. 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 Kolmatierung einer Pflasterfläche weist hochgradig stochastische Attribute auf und ihre Ausprägung ist nicht vorhersagbar. Auf der Basis der ausgewerteten Messdaten lässt sich der stochastische Charakter des Versickerungsvermögens mit der nachstehend dargestellten Häufigkeitsverteilung quantitativ umschreiben.



Abbildung 97: Häufigkeitsverteilung des Versickerungsvermögens typischer Plasterbauweisen

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

¹⁸⁷ z.B. aus verkehrlicher Nutzung (Abrieb von Reifen, Bremsbelägen etc.)

stärker nimmt das Versickerungsmögen bei steigendem Gefälle ab. Daher spielt das Oberflächengefälle bei fugenarmen Pflasterbauweisen mit gefügedichten Pflastersteinen eine größere Rolle als bei stärker durchlässigen Flächenbelägen mit einem hohen Anteil an meist splittgefüllten Fugen oder Kammern.

Im Vergleich zu einem Mindestgefälle von 2,5%, mit dem Pflasterflächen im Straßenbau allgemein zu verlegen sind, ergeben sich bei einem Gefälle von 5,0% um ca. 10%-20% reduzierte Versickerungsleistungen. Bei einem Gefälle von 7,5% resultieren um ca. 25%-35% reduzierte Versickerungsleistungen. Für ein geringeres Gefälle von 1,0%, mit dem ausschließlich besonders wasserdurchlässige Pflasterbauweisen verlegt werden dürfen, resultieren im Vergleich zu einem Gefälle von 2,5% um ca. 10% erhöhte Versickerungsleistungen. Die Prozentangaben sind hierbei als Näherungswerte zu verstehen, die eine häufig anzutreffende Größenordnung beziffern. Je nach Pflastertyp, Kolmationsgrad und Niederschlagsbelastungen können hiervon erheblich abweichende Werte auftreten.

Das momentane Infiltrationsvermögen einer konkreten Flächenbefestigung – also bestimmtem Aufbau, bestimmtem Oberflächengefälle sowie bestimmten bei Kolmationsgrad – wird ganz wesentlich von der Niederschlagsbelastung beeinflusst. Sowohl die Messungen an Bestandflächen als auch die Lysimeterversuche und die numerischen Strömungssimulationen haben einen signifikanten Zusammenhang zwischen der momentanen Infiltrationsrate und der jeweiligen Regenbzw. 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 höheren Regenintensitäten noch weitaus mehr Wasser aufzunehmen. Das Einsetzen des Oberflächenabflusses markiert also nicht den Zeitpunkt, an dem das Versickerungsvermögen einer Pflasterfläche vollständig ausgereizt 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 Flächenbereichen in den Oberbau infiltrieren kann.

Verantwortlich für dieses Phänomen ist das kleinräumige Versickerungsverhalten im Fugenraum. Zum einen ist davon auszugehen, dass das Versickerungsvermögen der Fugen nicht an jeder Stelle einer Pflasterfläche identisch ist, sondern infolge von variierenden Fugenweiten und Inhomogenitäten des Fugenmaterials in einer durchaus nennenswerten Größenordnung schwankt. Bei geringeren Regenintensitäten wird dadurch die maximal mögliche Infiltrationsleistung nicht an allen Stellen des Fugenraumes ausgenutzt. Bei höheren Intensitäten werden diese Kapazitäten dagegen immer stärker ausgeschöpft, bis ein Maximum erreicht ist. Darüber hinaus werden im Fugenraum bei steigender Beregnungsintensität höhere Wassergehalte erreicht, mit denen höhere Wasserleitfähigkeiten und ein entsprechend höheres Versickerungsvermögen einhergehen. Ferner können präferierte Fließwege z.B. an den Seitenflächen der Pflastersteine 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 schließlich 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 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 in der Regel 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, je 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.

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 Pflasterbelages bzw. Fugenmaterials bestimmt wird, kann bislang nicht eindeutig beantwortet werden. Die Messwerte und Simulationsergebnisse ergeben hier kein eindeutiges Bild. Generell entleeren sich die Porenräume in der Fuge nach Regenende recht schnell. Entsprechend hat sich in den Laborversuchen und den Strömungsberechnungen nur eine marginale Beeinflussung des Versickerungsvermögens durch unterschiedlich lange Trockenperioden gezeigt. Bei den Messungen an Bestandsflächen ist dagegen durchaus ein Einfluss der Vorbefeuchtung nachzuweisen, der bei der Beprobung natürlicher Regenereignisse jedoch je nach Regenintensität ganz unterschiedlich ausgeprägt ist. Hier zeichnet sich ab, dass die Vorbefeuchtung bei höheren Regenintensitäten an Bedeutung gewinnt. Inwieweit hierbei Phänomene wie beispielsweise das Feuchte bedingte Quellen organischer Substanz im Fugenraum oder Hystereseeffekte eine Rolle spielen, ist bislang unklar. 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.

4.6.2 Bauartspezifische Kennwerte des Versickerungsvermögens

Auf der Grundlage der generierten Messdaten und den daraus hergeleiteten Schlussfolgerungen lassen sich die nachstehend tabellarisch aufgeführten Kenngrößen flächentypspezifischer Versickerungsleistungen ausweisen. Die einzelnen Tabellen tragen hierbei dem Einfluss wesentlicher, das Versickerungsvermögen beeinflussender Randbedingungen Rechnung. Die angegebenen Zahlenwerte repräsentieren jeweils die Größenordnung des je Belagstyp tendenziell zu erwartenden Versickerungsvermögens.

Angesichts der enormen Variabilität der Versickerungsleistungen sind die Werte in Bezug auf eine konkrete Einzelfläche mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet, zumal für einige Flächentypen der Umfang an Messdaten nach wie vor sehr eingeschränkt ist. Dennoch stellen die Tabellen praktikable Hilfestellungen zur Abschätzung des Versickerungsvermögens der verschiedenen Belagstypen dar. Die aufgeführten Flächentypen decken dabei ein großes Spektrum wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen ab.

In Tabelle 16 ist das bauartspezifische Versickerungsvermögen differenziert nach der statistischen Unterschreitungshäufigkeit aufgeführt. Die angegebenen Zahlenwerte basieren i.W. auf den Häufigkeitsverteilungen, die im Rahmen der Datenanalyse in Kapitel 4.2 erarbeitet wurden.

Flächentyp		Unterschreitungshäufigkeit					
			≤ 10%	25%	50%	75%	≥ 90%
Befestigungsart Fugenanteil Fugenmaterial			Versickerungsvermögen [l/(s·ha)]				
Plattenbelag, fugenarm	≤ 3%	Sand	≤1	15	25	75	≥ 150
Pflasterbelag, fugenarm	3%-6%	Sand	≤ 1	25	50	125	≥ 250
Rasengittersteine	- -	- -	≤ 50	125	250	400	≥ 700
Pflasterbelag, fugenreich	6%-12%	Sand	≤ 50	150	400	900	≥ 2.000
Pflassterbelag aus Porenbeton	- -	- -	≤ 50	175	500	1.500	≥ 3.000
Pflasterbelag mit Sicker- fugen od. Kammern	> 4,5 %	Splitt	≤ 50	300	850	2.500	≥ 5.000

Tabelle 16:Bauartspezifische Kennwerte des Versickerungsmögen in Abhängigkeit
von der Auftretenswahrscheinlichkeit

Tabelle 17 enthält Wertebereiche der Versickerungsleistung differenziert nach der verkehrlichen Inanspruchnahme durch Kraftfahrzeuge. Hierbei wurde bewusst eine lediglich grobe Differenzierung zwischen Flächen mit geringer und/oder unregelmäßiger Verkehrsbelastung sowie hoher und/oder regelmäßiger Belastung gewählt, da eine weiter gehende Differenzierung angesichts der begrenzten Datenbasis nicht angemessen erscheint.

Tabelle 17:Bauartspezifische Kennwerte des Versickerungsmögen in Abhängigkeit
von der verkehrlichen Belastung durch Kraftfahrzeuge

Flächentyp		verkehrliche Belastung durch Kraftfahrzeuge			
			gering bzw. unregelmäßig	hoch bzw. regelmäßig	
Befestigungsart	Fugenanteil	Fugenmaterial	Versickerungsvermögen [l/(s·ha)]		
Plattenbelag, fugenarm	≤ 3%	Sand	15 - 50	5 - 25	
Pflasterbelag, fugenarm	3%-6%	Sand	40 - 125	10 - 80	
Rasengittersteine	-1-	- -	200 - 400	150 - 250	
Pflasterbelag, fugenreich	6%-12%	Sand	250 - 600	100 - 400	
Pflassterbelag aus Porenbeton	- -	- -	300 - 1.000	150 - 500	
Pflasterbelag mit Sicker- fugen od. Kammern	> 4,5 %	Splitt	400 - 1.500	200 - 700	

Als gering belastet werden hierbei Flächen angesehen, die nur selten von Kraftfahrzeugen in Anspruch genommen werden, wie bspw. Gehwege, Radwege, Hofflächen und Feuerwehrzufahrten. Bei Straßenflächen, insbesondere im innerstädtischen Bereich, ist von deutlich geringeren Versickerungsleistungen auszugehen. Gleiches gilt für intensiv genutzte Parkplätze oder auch Fußgängerzonen¹⁸⁸. Bei vergleichsweise mäßig frequentierten Parkplatz- und Straßenflächen sind Versickerungsleistungen zu erwarten, die im unteren Wertebereich der linken bzw. im oberen Wertebereich der rechten Spalte in Tabelle 17 liegen.

Die Angabe von Wertebereichen anstelle einzelner Zahlenwerte soll die Ungewissheit über das tatsächlich bei einer konkreten Fläche anzutreffende Versickerungsvermögen untersteichen. Zudem ist die Flächennutzung nur eine von zahlreichen äußeren Randbedingungen, die das Versickerungsvermögen bestimmen. Die Mittelwerte der je Nutzungskategorie angegebenen Wertebereiche entsprechen jeweils in etwa dem im Mittel anzutreffenden Versickerungsvermögen. Die Einschätzung des jeweiligen Verkehrsaufkommens obliegt ebenso wie die letztlich getroffene Bewertung des Versickerungsvermögens dem Anwender der Tabelle.

Ebenso wie für die verkehrliche Nutzung konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ein merklicher Zusammenhang zwischen der Liegezeit einer Fläche und dem anzutreffenden Versickerungsvermögen nachgewiesen werden. In nachstehender Tabelle 18 sind Größenordnungen des je nach Flächenalter im Mittel zu erwartenden Versickerungsvermögens angegeben.

Flächentyp		Liegezeit der Pflasterfläche				
			≤ 2 Jahre	≤ 5 Jahre	> 5 Jahre	
Befestigungsart	Fugenanteil	Fugenmaterial	Versickerungsvermögen [l/(s·ha)]			
Plattenbelag, fugenarm	≤ 3%	Sand	30 - 100	25 - 70	5 - 30	
Pflasterbelag, fugenarm	3%-6%	Sand	50 - 200	20 - 125	10 - 90	
Rasengittersteine	-1-	- -	200 - 500	175 - 350	150 - 300	
Pflasterbelag, fugenreich	6%-12%	Sand	250 - 700	150 - 600	100 - 500	
Pflassterbelag aus Porenbeton	- -	- -	300 - 2.000	200 - 1.500	150 - 600	
Pflasterbelag mit Sicker- fugen od. Kammern	> 4,5 %	Splitt	500 - 3.000	300 - 2.000	200 - 800	

Tabelle 18:	Bauartspezifische Kennwerte des Versickerungsmögen in Abhängigkeit
	von der Liegezeit der Fläche

¹⁸⁸ Bei Fußgängerzonen ist die verkehrliche Inanspruchnahme zwar vergleichsweise gering. Dennoch ist durch die intensive Nutzung mit einem hohen Aufkommen an kolmativ wirkenden Feinpartikeln zu rechnen.

In der Tabelle wird nach Liegezeiten von bis zu zwei Jahren, von bis zu fünf Jahren sowie von über fünf Jahren differenziert. Wiederum sind lediglich Wertebereiche angegeben, da die Liegezeit (analog der Flächennutzung zuvor) nicht das alleinige Kriterium für die Höhe des Versickerungsvermögens darstellt. Je nach betrachteter Niederschlagsbelastung oder spezifischen Flächencharakteristika sollten hier entsprechend Werte aus dem unteren oder oberen Wertebereich gewählt werden.

Das Oberflächengefälle stellt neben der Bauart ein primäres Flächenmerkmal dar, das ebenfalls die Versickerungskapazität einer Flächenbefestigung bestimmt. Dabei sind für die verschiedenen Flächentypen im Mittel die in Tabelle 19 ausgewiesenen Größenordnungen des Versickerungsvermögens zu erwarten.

Tabelle 19:	Baurtspezifische Kennwerte des Versickerungsmögen in Abhängigkeit
	vom Oberflächengefälle

Flächentyp		Oberflächengefälle					
			< 2,5%	2,5%	5,0%	7,5%	> 7,5%
Befestigungsart Fugenanteil Fugenmaterial			Versickerungsvermögen [l/(s·ha)]				
Plattenbelag, fugenarm	≤ 3%	Sand	35 - 70	30 - 60	25 - 55	20 - 50	15 - 45
Pflasterbelag, fugenarm	3%-6%	Sand	45 - 110	40 - 100	35 - 90	30 - 75	20 - 60
Rasengittersteine	-1-	- -	175 - 350	150 - 300	135 - 270	115 - 225	75 - 200
Pflasterbelag, fugenreich	6%-12%	Sand	225 - 650	200 - 600	175 - 550	150 - 500	125 - 450
Pflassterbelag aus Porenbeton	- -	- -	330 - 1.100	300 - 1.000	275 - 950	250 - 875	225 - 800
Pflasterbelag mit Sicker- fugen od. Kammern	> 4,5 %	Splitt	550 - 1.300	500 - 1.200	475 - 1.100	450 - 1.000	400 - 900

Mit den erarbeiteten Versickerungskennwerten wird eine deutlich verbesserte und zugleich durch umfangreiche Messungen und Analysen abgesicherte Grundlage zur quantitativen Bewertung des Versickerungsvermögens wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen bereit gestellt. Eine derart kompakte und gleichermaßen belastbare Darstellung von belagsweise differenzierten Versickerungsleistungen war bislang nicht verfügbar. Kenngrößen, die durch eine ausreichende Anzahl an Messungen unterfüttert sind, konnten lediglich zu einzelnen Belagstypen aus verschiedenen Einzeluntersuchungen entnommen werden (vgl. Kapitel 2.4). Die ausgewiesenen Zahlenwerte erweitern auch die in Kapitel 2.3.2 genannten Empfehlungswerte von Schmitt und Illgen¹⁸⁹ bzw. der DWA-

¹⁸⁹ Schmitt, T. G. und Illgen, M. (2001); vgl. Tabelle 5 auf Seite 69

Arbeitsgruppe ES-2.6¹⁹⁰, die aus der Gegenüberstellung mit Abflussbeiwerten des DWA-Regelwerks abgeleitet wurden. Zum Teil korrigieren sie diese Empfehlungswerte aber auch in gehörigem Maß, was angesichts der zwischenzeitlich enorm gewachsenen Datengrundlage und des beträchtlich gestiegenen Kenntnisstandes jedoch nicht überraschen kann. Gleichwohl sollte die Neubewertung des Versickerungsvermögens von Pflasterbauweisen nicht dazu führen, dass vorhandene Sicherheiten in den Kanalnetzen im Hinblick auf den Überflutungsschutz aufgegeben werden.

Auch wenn die in Tabelle 16 bis Tabelle 19 ausgewiesenen Kennwerte die generelle Problematik der enormen Variabilität des Versickerungsvermögens nicht vollends abbilden können, grenzen sie den Wertebereich angemessener Versickerungsleistungen doch deutlich ein. Sie liefern zudem eine Systematisierung des in erheblichem Maße variierenden Versickerungsvermögens, in dem sie unterschiedliche Flächencharakteristika und Einflussfaktoren entsprechende Versickerungskapazitäten zuordnen. Die Tabellen können Planern als wertvolle Orientierungsgrößen dienen und stellen auch die Basis zur Ableitung von Abflussbeiwerten sowie von Modellparametern zur urbanhydrologischen Berechnung im nachfolgenden Teil dieser Arbeit dar.

TEIL C

URBANHYDROLOGISCHE QUANTI-FIZIERUNG DES VERSICKERUNGS-VERHALTENS

5 Urbanhydrologische Erfassung des Versickerungsverhaltens

Die Abschätzung oder Ermittlung des Abflussbeitrages wasserdurchlässig ausgebildeter Flächenbeläge im Rahmen entwässerungstechnischer Planungen ist keine triviale Aufgabe. Der Planer sieht sich hier konfrontiert mit einer enormen Schwankungsbreite des Versickerungsvermögens. Daher ist stets eine sehr sorgfältige Abwägung der entsprechenden Bemessungsparameter erforderlich; seien es Abflussbeiwerte oder Modellparameter zu Abflusssimulation. Hierbei muss stets den Randbedingungen und Anforderungen des jeweiligen Planungsfalles Rechnung getragen werden.

Bislang fehlen jedoch detaillierte Hilfsmittel, um den Abflussbeitrag der unterschiedlichen Befestigungstypen sachgerecht quantifizieren können. Die diesbezüglichen Empfehlungen der aktuellen Regelwerke können weder das weit gefächerte Spektrum der auf dem Markt befindlichen Bauweisen abdecken, noch differenzieren sie ausreichend nach Gefälle, Kolmatierungsgrad oder Niederschlagsbelastungen. Somit steht bislang keine fundierte Entscheidungsgrundlage zur zielgerichteten Bewertung und Berechnung des Oberflächenabflusses wasserdurchlässig befestigter Siedlungsflächen zur Verfügung.

Auf der Basis der anhand von Literaturstudium, Feld- und Labormessungen sowie numerischen Strömungssimulationen im Rahmen dieser Arbeit gesammelten Erkenntnisse werden nachfolgend verschiedene Bemessungskennwerte abgeleitet, die als Orientierungsgrößen zu verstehen sind. Nicht alle ausgewiesenen Werte basieren unmittelbar auf Messdaten; vielfach wurden sie auf der Grundlagen des inzwischen erreichten Kenntnisstandes durch Analogieschlüsse sinnvoll abgewogen. 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

Wie in Kap. 2.3 ausgeführt, sind generell verschiedene Abflussbeiwerte zu unterscheiden. Die Regelwerke der DWA wie auch die in Deutschland gültigen Normen differenzieren im Wesentlichen zwischen mittleren Abflussbeiwerten und Spitzenabflussbeiwerten. Dabei ist den Abflussbeiwerten gemein, dass sie vorwiegend zur Quantifizierung des Abflussbeitrages aus Starkregenereignissen verwendet werden. Eine Ausnahme bildet hier lediglich der Abflussbeiwert ψ_{A128} im Kontext des ATV-Arbeitsblattes A 128 (1992), der zur Erfassung des im Jahresmittel zu erwartenden Abflussbeitrages befestigter Siedlungsflächen herangezogen wird.

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, zumal die Abflussbeiwerte überwiegend in Kombination mit konstanten Niederschlagsintensitäten (Blockregen) verwendet werden. Die empfohlenen Werte sind daher als mittlere Abflussbeiwerte sowie als Spitzenabflussbeiwerte zur Bemessung anwendbar.

Darüber hinaus wurde auf eine Differenzierung nach der 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, die Empfehlungswerte jedoch wesentlich griffiger macht. Überdies liegen bislang zu wenige Kenntnisse vor, inwiefern sich die Versickerungskapazität je nach Regendauer und Sättigungszustand ändern kann. 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 können die angegebenen Abflussbeiwerte 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. Einige Anwendungs- und Ablesebeispiele sind im Anhang zu finden.

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 Rückhalteleistung 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 über die Kolmationsgrade indirekt eine stochastische Bewertung hinsichtlich der Eintretenswahrscheinlichkeit. Den Abflussbeiwerten liegen jeweils Versickerungskapazitäten zu Grunde, die mit Blick auf die in Abbildung 97 ausgewiesenen Zuordnung der verschiedenen Kolmationsgrade zu den statistischen Unterschreitungshäufigkeiten gewählt wurden. Einer extremen Kolmation wird hierbei ein Versickerungsvermögen mit einer statistischen Unterschreitungshäufigkeit ≤ 15% zugeordnet. Das Versickerungsvermögen bei mäßiger Kolmation entspricht in etwa einer Unterschreitungshäufigkeit von 25%. Eine ausgeprägte Kolmation repräsentiert im Mittel zu erwartende Versickerungsleistung in der Größenordnung des Median. Für die Kategorien mit geringer bzw. ohne nennenswerte Kolmation werden Versickerungskapazitäten mit statistischen Unterschreitungshäufigkeiten von rd. 75% bzw. ≥ 85% herangezogen.

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 98 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. Infiltrationsleistungen über 150 l/(s·ha) sind für diesen Belagstyp auch bei geringem Kolmationsgrad nicht zu erwarten. Entsprechend resultieren hier bereits für Regenspenden deutlich unter 250 l/(s·ha) relativ hohe Abflussbeiwerte. Darüber hinaus steigt der Abflussbeiwert bei zunehmender Kolmation des Belages umso steiler an.



Abbildung 98: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenarm verlegte Plattenbeläge (Fugenanteil ≤ 3%)

Dennoch demonstrieren die Grafiken die enorme Bandbreite die der Abflussbeiwert selbst für diesen insgesamt recht gering durchlässigen Belagstyp einnehmen kann und unterstreichen die gebotene Differenzierung nach Niederschlagsbelastung und Zustand der Fläche.

Die empfohlenen Abflussbeiwerte für herkömmliches, fugenarm verlegtes Pflaster aus gefügedichten Natur- oder Betonsteinen sind in Abbildung 99 dargestellt. Hierunter fallen alle Pflasterbauweisen aus gängigen Rechteck- und Verbundsteinen, die Fugenweiten \leq 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 99: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenarm verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 3%-6%)

Pflasterbeläge dieses Typs können bei geringem Kolmationsgrad außerordentlich hohe Infiltrationsraten aufweisen. Die angegebenen Abflussbeiwerte für einen Belag im Neuzustand sowie bei mäßiger Kolmation beruhen allerdings auf der Annahme von vergleichsweise moderaten Versickerungsleistungen. Dennoch weisen auch hier die Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Niederschlagsintensität, Gefälle und Kolmationsgrad eine sehr große Streuweite auf. Das Vorgenannte gilt hier analog.

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 100 dargestellt, in entsprechend hohen Abflussbeiwerten für diesen Gebrauchszustand wider. Abflussbeiwerte > 0,70 sind dagegen nur in Ausnahmefällen und bei Niederschlagsbelastungen \geq 300 l/(s·ha) zu erwarten.



Abbildung 100: 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 etwas geringeren Einfluss des Oberflächengefälles auf die Versickerungsleistung auszugehen. Entsprechend liegen die in Abbildung 101 ausgewiesenen Zahlenwerte auf deutlich niedrigerem Niveau. Dabei wird bspw. angenommen, dass eine Infiltrationsrate von über 100 l/(s·ha) immer anzutreffen ist.



Abbildung 101: 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 102 dargestellten Abflussbeiwerten Rechnung getragen.



Abbildung 102: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für poröse Pflasterbeläge aus haufwerksporigen Betonsteinen

Während für Rasengitterbeläge einige Messwerte aus Infiltrationsversuchen vor liegen und auch in die statistische Analyse in Kapitel 4.2 eingeflossen sind, sind über die Versickerungskapazitäten von Flächenbefestigungen aus Schotterrasen keine umfangreichen Untersuchungen bekannt. Sie waren auch nicht Bestandteil der messtechnischen Untersuchungen im Rahmen der Arbeit. In der Fachliteratur finden sich lediglich einige wenige Kennwerte zum Versickerungsvermögen diese Flächentypen¹⁹¹, 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 Regenintensität berücksichtigt, da hierfür die vorhandene Datenlage nicht ausreicht. Die in Abbildung 103 dargestellten Abflussbeiwerte für Schotterrasen stellen daher nur eine grobe Abschätzung dar.



Abbildung 103: 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 und müssen an dieser Stelle unberücksichtigt bleiben. Nichtsdestotrotz decken die vorstehenden Empfehlungen ein großes Spektrum an Belagstypen ab.

¹⁹¹ u.a. Kolb et al. (1998), Kolb et al. (2000) und Nolting et al. (2005)

5.2 Modellparameter zur Abflusssimulation

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. Empfehlungen zu flächenspezifischen Anfangsverlusthöhen sind darüber hinaus im Anhang enthalten.

Der Ansatz nach Horton verwendet vier Modellparameter: die Anfangsversickerungsrate f₀, die Endversickerungsrate f_e, den Abnahmekoeffizienten k sowie den Regenerationskoeffizienten 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.¹⁹²

Die Anfangs- und die Endfiltrationsraten nach Horton können prinzipiell unmittelbar aus den bekannten Versickerungskapazitäten abgeleitet werden. Dabei stellt sich lediglich die Schwierigkeit, einen sinnvollen Wert für die Anfangsversickerungsrate festzulegen. Darüber hinaus kann der Ansatz von Horton das mit der Niederschlagsintensität de facto variierende Versickerungsvermögen nicht widerspiegeln. Bei der Betrachtung unterschiedlicher Niederschlagsbelastungen wären 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. Dennoch werden nachfolgend bauartspezifische 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. Tabelle 22 und Tabelle 23 enthalten die zugehörigen Wertebereiche der Endinfiltrationsrate. Die je Flächentyp angegebenen Zahlenwerte erstrecken sich dabei mitunter über einen großen Wertebereich und spiegeln die hohe Variabilität im Versickerungsvermögen der betrachteten Befestigungsarten wider.

¹⁹² vgl. Kapitel 2.3.2

Tabelle 20:Empfohlener Wertebereich der Anfangsversickerungsrate im Modellan-
satz nach Horton in [l/(s·ha)] bei deutlicher Kolmation

Flächentyp	Regeni	ntensitätss	pektrum [l/	′(s⋅ha)]		
			< 100	100-200	200-300	> 300
Befestigungsart	Fugenanteil	Fugenmaterial	Flächenbe	efestigung m	it 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	-1-	- -	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 21:Empfohlener Wertebereich der Anfangsversickerungsrate im Modellan-
satz nach Horton in [l/(s·ha)] bei mäßiger Kolmation

Flächentyp			Regeni	ntensitätss	pektrum [l/	′(s⋅ha)]
			< 100	100-200	200-300	> 300
Befestigungsart	Fugenanteil	Fugenmaterial	Flächenb	efestigung n	nit mäßiger k	Colmation
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	-1-	- -	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

Flächentyp			Regeni	ntensitätss	pektrum [l/	′(s⋅ha)]
			< 100	100-200	200-300	> 300
Befestigungsart	Fugenanteil	Fugenmaterial	Flächenbe	efestigung m	it 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	-1-	- -	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 22:Empfohlener Wertebereich der Endversickerungsrate im Modellansatz
nach Horton in [l/(s·ha)] bei deutlicher Kolmation

Tabelle 23:Empfohlener Wertebereich der Endversickerungsrate im Modellansatz
nach Horton in [l/(s·ha)] bei mäßiger Kolmation

Flächentyp			Regeni	ntensitätss	pektrum [l/	′(s⋅ha)]
			< 100	100-200	200-300	> 300
Befestigungsart	Fugenanteil	Fugenmaterial	Flächenb	efestigung n	nit mäßiger K	olmation
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	-1-	- -	400-1000	450-1100	500-1200	550-1300
Rasengittersteine	- -	- -	250-1000	260-1050	270-1100	280-1100
Schotterrasen	-1-	- -	120-500	140-550	160-600	170-650

Generell ist bei versickerungsfähig ausgebildeten Flächenbefestigungen, anders als bei natürlichen Böden, nicht mit einer sehr 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 meist innerhalb von 5-15 Minuten abgeschlossen.

Im Ansatz nach Horton wird dieser Rückgang in der Versickerungsrate über den Abnahmekoeffizient k beschrieben. In Abbildung 104 sind die mit verschiedenen Abnahmekoeffizienten resultierenden Verläufe der Infiltrationsrate exemplarisch dargestellt. Zur Anwendung auf wasserdurchlässige Flächenbefestigungen sollten Zahlenwerte in einer Größenordnung von 0,10-0,50 min⁻¹ verwendet werden. Es erscheint jedoch insgesamt ausreichend, die hohen Anfangsversickerungsraten durch entsprechend erhöhte Anfangsverluste in Kombination mit identischen Zahlenwerten für die Anfangs- und die Endinfiltrationsrate abzubilden.



Abbildung 104: Verlauf der Infiltrationsrate im Ansatz nach Horten für verschiedene Abnahmekoeffizienten

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. Wie in Abbildung 105 veranschaulicht wird dadurch 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.



Abbildung 105: Verlauf der Infiltrationsrate im Ansatz nach Horten für verschiedene Regenerationskoeffizienten

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.¹⁹³ 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 kleinere 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

¹⁹³ z.B. Schmitt, T.G. (2000); Schmitt, T.G. et al. (2001) und DWA (2007)

hoch kritisiert werden.¹⁹⁴ Die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelten Empfehlungen zu Abflussbeiwerten sowie zu Parameterwerten im Ansatz nach Horton vermögen dagegen das Versickerungsvermögen des breiten Spektrums durchlässiger Flächenbefestigungen weitaus besser widerzuspiegeln und zu quantifizieren. Dennoch verbleiben erhebliche Unsicherheiten bezüglich der Wahl der Modellparameter.

¹⁹⁴ z.B. Borgwardt, S. (1994b); Hanses et al. (1999) und Timmermann, U. (1999)

5.3 Urbanhydrologische Vergleichssimulationen

5.3.1 Zielsetzung und Vorgehensweise der Simulationsstudie

Trotz der verbesserten Grundlage zur Simulation des Abflussverhaltens durchlässig befestigter Siedlungsflächen weisen die gängigen urbanhydrologischen Modellansätze grundsätzliche Defizite auf, die zu erheblichen Unsicherheiten bei der Modellierung führen können. Der Berechnungsansatz nach Horton/Paulsen ist ebenso wie der mathematisch verwandte Ansatz nach Neumann nicht in der Lage, die mit steigender Niederschlagsintensität zunehmende Versickerungsleistung durchlässig befestigter Flächen abzubilden. Darüber hinaus können die Ansätze weder die enorme bauartspezifische Variabilität noch die kleinräumige, standortspezifische Variabilität des Infiltrationsvermögens ohne Weiteres abbilden. Stattdessen sieht sich der Modellanwender mit der Problematik konfrontiert, aus den z.T. immer noch recht großen Wertebereichen der empfohlenen Versickerungsparameter sachgerechte Zahlenwerte auszuwählen.

Anhand von urbanhydrologischen Vergleichssimulationen an Einheitsflächen sowie an fiktiven und realen Einzugsgebieten wurde daher versucht, weiter gehende Anwendungsempfehlungen zu erarbeiten, mit deren Hilfe die bestehenden Defizite der konventionellen Berechnungsansätze weiter minimiert werden können. Die Vergleichssimulationen zielen dagegen nicht darauf ab, neue Erkenntnisse zum Versickerungsvorgang auf durchlässig befestigten Siedlungsflächen zu erzielen. Die Analyse des Versickerungsphänomens erfolgte ausschließlich in Teil B dieser Arbeit. Im Rahmen der Simulationsstudie steht nun allein die praktische Umsetzung bei der Modellierung im Vordergrund.

Die Vergleichssimulationen dienen zum einen dazu, die Empfehlungswerte der Modellparameter auf ihre allgemeine Praktikabilität und insbesondere auf ihre Konsistenz mit den empfohlenen Abflussbeiwerten zu überprüfen. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde untersucht, in welcher Größenordnung sich die subjektive Wahl von Parameterwerten durch den Anwender in den Berechnungsergebnissen bei unterschiedlichen Regenbelastungen niederschlagen kann. Des Weiteren wurde der Fragen nachgegangen, wie der stochastische Charakter des Versickerungsvermögens, der sich in einer beträchtlichen Schwankungsbreite des Versickerungsvermögens äußert, zumindest näherungsweise erfasst werden kann. Hierzu wurde getestet, ob ein Ansatz nach Auftretenswahrscheinlichkeit gestaffelter Versickerungsparameter zu einer besseren Erfassung der Variabilität des Infiltrationsvermögens beitragen kann. Darüber hinaus wurde untersucht, in welchem Maße bei der praktischen Modellanwendung nach Flächenkategorien unterschiedlicher Versickerungskapazität zu differenzieren ist bzw. inwieweit Flächentypen ähnlichen Versickerungsvermögens gemeinsam im Modell abgebildet werden können. Hierzu wurden Vergleichssimulationen bei pauschaler Abbildung der durchlässigen Siedlungsflächen in einer Kategorie sowie bei detaillierterer Abbildung in mehreren Kategorien mit entsprechend variierenden Parameterwerten durchgeführt und einander gegenüber gestellt. Anhand von Langzeitsimulationen über 44 Jahre wurden zudem Jahresabflussbilanzen der unterschiedlichen Flächentypen erstellt.

Je nach Fokus der Betrachtung wurden die Vergleichssimulationen für Einheitsflächen der gängigen Befestigungstypen und/oder für ganze Einzugsgebiete vollzogen. Zur Anwendung kam dabei das Berechnungsprogramm erwin 4.0.

5.3.2 Niederschlagsabflussmodell erwin 4.0

Das Programm erwin 4.0¹⁹⁵ ist ein hydrologisches Niederschlagsabflussmodell zur Berechnung von urbanen Entwässerungssystemen, das vorwiegend als Planungsinstrument zur Dimensionierung von dezentralen und semi-zentralen Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung herangezogen wird.

Das Modell arbeitet mit gängigen methodischen Berechnungsansätzen, wie sie auch in Kapitel 2.3.2 knapp erörtert sind. Für undurchlässig wie für durchlässige Siedlungsflächen wird der niederschlagsbedingte Abflussbeitrag über Einzelverlustansätze ermittelt. Benetzungsverluste werden zu Regenbeginn einfach bilanziert; Muldenverluste werden nach der Grenzwertmethode berechnet. Versickerungsverluste auf durchlässigen Flächen werden über den Ansatz nach Horton/Paulsen bestimmt. Die Regeneration der Verlustpotenziale in Trockenphasen wird über vorgegebene monatliche und tageszeitliche Verdunstungsraten bilanziert bzw. für die Versickerungsverluste über die Regenerationskonstante im Ansatz von Horton/Paulsen berechnet. Die Parameterwerte der Einzelverluste sind entsprechend vorzugeben. Die Berechnung des abflusswirksamen Niederschlages erfolgt für durchlässige und undurchlässige Flächenanteile getrennt von einander.

Der Prozess der Abflusskonzentration wird über lineare Speicherkaskaden abgebildet, wobei im vorliegenden Fall angesichts der Betrachtung kleiner Flächen bzw. Gebiete mit entsprechend kurzen Schwerpunktlaufzeiten ein Einzellinearspeicher mit einer maximalen Speicherkonstante von k = 5 verwendet wurde. Bei der Berechnung des Abflusstransportes wird vereinfachend eine reine Translation der Abflusswelle berücksichtigt. Als Niederschlagsinput können

¹⁹⁵ © ifs – Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie mbH, Programmversion 4.03 (2002)

Einzelregen mit variabler Intensität vorgegeben oder Niederschlagsreihen zur Langzeitsimulation verwendet werden.

Aufgrund seiner Berechnungsmethodik repräsentiert erwin 4.0 ein typisches urbanhydrologisches Abflussmodell und ist damit für den vorliegen Anwendungsfall bestens geeignet.

5.3.3 Vergleichssimulationen für Einheitsflächen

In einem ersten Schritt wurden jeweils Einheitsflächen der gängigen wasserdurchlässigen Pflasterbauweisen mit einer Flächengröße von 1,0 ha betrachtet und die Modellparameter entsprechend den Empfehlungswerten in 5.2 gewählt. Je Belagstyp wurden Simulationen mit drei unterschiedlichen Parametersätzen für jeweils zwei Kolmationsgrade durchgeführt. Zur Evaluierung der Sensitivität der Versickerungsparameter im Ansatz nach Horton wurden jeweils der obere sowie der untere Wert des empfohlenen Wertebereiches angesetzt. Zur Prüfung der Konsistenz der empfohlenen Parameterwerte mit den ausgewiesenen Abflussbeiwerten wurde zudem jeweils ein Zahlenwert aus dem mittleren Bereich der angegebenen Wertespanne gewählt. Als Niederschlagsbelastungen wurden 20-minütige Blockregen mit Intensitäten von 50 l/(s·ha), 150 l/(s·ha), 250 l/(s·ha) und 350 l/(s·ha) betrachtet.

Exemplarisch sind die Simulationsergebnisse der beiden Belagstypen aus fugenarmem Normalpflaster und Porenbetonpflaster bei ausgeprägter Kolmation in Abbildung 106 dargestellt. Die beiden Grafiken zeigen jeweils die Gegenüberstellung empfohlener und mit den unterschiedlichen Parameterannahmen berechneter mittlerer Abflussbeiwerte.



Abbildung 106: Gegenüberstellung empfohlener und bei unterschiedlichen Parameterannahmen berechneter Abflussbeiwerte für fugenarmes Normalpflaster und Porenbetonpflaster bei ausgeprägter Kolmation

In den Ergebniswerten der Vergleichssimulationen bestätigt sich erwartungsgemäß, dass bei Ansatz von Parameterwerten aus dem mittleren Bereich des empfohlenen Wertespektrums rechnerische Abflussbeiwerte resultieren, die in der Größenordnung der empfohlenen Abflussbeiwerte liegen. Dies gilt insbesondere für gering bis mäßig durchlässige Belagstypen wie bspw. das fugenarme Standardpflaster.¹⁹⁶ Die Konsistenz zwischen den Empfehlungswerten ist grundsätzlich gegeben.

Es zeigte sich jedoch auch, dass bei stärker durchlässigen Flächen je nach gewählten Parameterwerten durchaus sehr große Abweichungen zwischen den rechnerischen und den empfohlenen Abflussbeiwerten entstehen können.¹⁹⁷ Dies liegt in erster Linie darin begründet, dass besonders durchlässige Flächentypen generell ein hohes Versickerungsvermögen aufweisen, die Versickerungsleistungen in einem besonders großen Wertebereich variieren können und die Empfehlungswerte entsprechend große Spannweiten aufweisen. Dadurch schlagen Variationen der Parameterwerte wesentlich deutlicher zu Buche. Die Sensitivität der Versickerungsparameter in Bezug auf den rechnerischen Abflussbeiwert ist hier ungleich größer als bei gering bis mäßig durchlässigen Flächentypen. Größere Differenzen zwischen rechnerischen und empfohlenen Abflussbeiwerten sind daher bei diesen Flächentypen nicht Ausdruck unsachgemäßer Parameterwerte. Vielmehr sind sie Ausdruck der Unsicherheit, mit der die Modellierung wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen verbunden ist. Dies unterstreicht die Schwierigkeit für den Modellanwender, einen adäquaten Parameterwert auszuwählen.

In einem zweiten Schritt wurde evaluiert, wie sich eine weiter gehende Differenzierung der Einheitsflächen in Segmente unterschiedlichen Versickerungsvermögens auf die Berechnungsergebnisse auswirkt. Dieser Untersuchungsschritt zielt auf eine verbesserte Abbildung der Variabilität des Versickerungsvermögens ab. Konventionelle urbanhydrologische Berechnungsansätze sprechen durchlässigen Einzugsgebietsflächen ein pauschales Versickerungsvermögen zu, das lediglich zwischen der vorgegebenen Anfangsversickerungsrate und der Endversickerungsrate schwanken kann. Daher ist zu erwarten, dass aus dem Ansatz eines pauschalen Parametersatzes mit Parameterwerten mittlerer Größenordnung je nach betrachteter Niederschlagsintensität das örtlich und kleinräumig variable Versickerungsvermögen nur unzureichend erfasst wird.

Im Rahmen der Simulationsstudie wurden daher für drei exemplarische Flächentypen Vergleichsrechnungen durchgeführt, bei denen die betrachteten Einheitsflächen in bis zu 10 größengleiche Flächensegmente unterteilt und separat

¹⁹⁶ siehe linke Grafik in Abbildung 106

¹⁹⁷ siehe rechte Grafik in Abbildung 106

modeliiert wurden. Den jeweiligen Segmenten wurden hierbei Versickerungsparameter entsprechend der statistischen Unterschreitungshäufigkeit des Infiltrationsvermögens zugeordnet. Je Belagstyp wurden fünf unterschiedliche Differenzierungsgrade bezüglich der Flächenabbildung im Modell betrachtet. Die drei untersuchten Belagstypen aus konventionellem Funktionspflaster, Rasenpflaster und Porenbetonpflaster stehen hierbei stellvertretend für Flächen mäßigen, mittleren und hohen Versickerungsvermögens. Die je Differenzierungsgrad gewählten Versickerungsparameter für den Belagstyp des fugenarmen Standardpflasters sind in Tabelle 24 aufgeführt. Die für Rasenpflaster und Porenbetonpflaster je Differenzierungsgrad angesetzten Parameterwerte sind im Anhang enthalten.

FUGENARMES VERBUNDPFLASTER (FUGENANTEIL < 6%)											
Unterschreitungshäufigkeit [%]		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
sehr hoher Differenzierungsgrad	$\begin{array}{c} \mathbf{f_0} [l/(s \cdot ha)] \\ \mathbf{f_E} [l/(s \cdot ha)] \end{array}$	0	20 15	30 25	45 40	60 50	80 70	125 110	150 135	220 200	375 350
hoher Differenzierungsgrad	f ₀ [l/(s·ha)] f _E [l/(s·ha)]	10,0 7,5		37 32	,5 70,0 ,5 60,0),0),0	137,5 122,5		297,5 275,0	
mittlerer Differenzierungsgrad	f ₀ [l/(s⋅ha)] f _E [l/(s⋅ha)]		16,67 13,33			77,50 67,50			248,33 228,33		
geringer Differenzierungsgrad	f ₀ [l/(s⋅ha)] f _E [l/(s⋅ha)]	31,00 26,00					190,00 173,00				
sehr geringer Differenzierungsgrad	f ₀ [l/(s·ha)] f _E [l/(s·ha)]		110,50 99,50								

Tabelle 24:	Gewählte Versickerungsparameter für fugenarmes Standardpflaster bei
	unterschiedlicher Flächendifferenzierung im Modell

Die Parameterwerte sind jeweils so gestaffelt, dass sich ausgehend von einem sehr hohen Differenzierungsgrad für die geringeren Differenzierungsgrade jeweils im Mittel gleichwertige Parameterwerte für die jeweiligen Flächenanteile ergeben. Abweichungen zwischen den Berechnungsvarianten können daher unmittelbar auf die unterschiedlich detaillierte Modellabbildung zurück geführt werden.

Als Niederschlagsbelastungen wurden 20-minütige Blockregen mit Intensitäten von 25 l/(s·ha) bis 500 l/(s·ha), vier natürliche Einzelereignisse unterschiedlicher Niederschlagscharakteristik sowie vier synthetische Niederschlagsreihen¹⁹⁸ unterschiedlicher Örtlichkeiten über jeweils 44 Jahre simuliert. Die Ergebniswerte aus der Blockregensimulationen sind für den konventionellen fugenarmen Pflasterbelag in Abbildung 107 dargestellt. Die prozentualen Differenzen aus der

¹⁹⁸ stochastische Zeitreihen zur Langzeitsimulation (NiedSim); Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2000)

unterschiedlichen Flächendifferenzierung zeigt Abbildung 108 am Beispiel der intensitätsspezifischen Abflussvolumina und Abflussspitzen.



Abbildung 107: Simulationsergebnisse für fugenarmes Standardpflaster bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung und variierenden Regenintensitäten



Abbildung 108: Prozentuale Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung für fugenarmes Standardpflaster und variierenden Regenintensitäten

Die beiden Abbildungen verdeutlichen, dass aus der unterschiedlich detaillierten Modellierung einer versickerungsfähigen Flächenbefestigung mitunter erhebliche Differenzen resultieren können. Die größten Abweichungen ergeben sich erwartungsgemäß zwischen höchster und geringster Differenzierung. Mit zunehmendem Differenzierungsgrad und entsprechend feiner diskretisierter Staffelung der Versickerungsparameter ergeben sich rechnerisch zunehmend geringere Infiltrationsleistungen der betrachteten Einheitsfläche. Für das Abflussvolumen sowie die Abflussspitze ergeben sich folglich mit zunehmender Pauschalisierung umso geringere Werte. Die Abweichungen zwischen den Modellierungsvarianten schwanken hierbei je nach zu Grunde gelegter Niederschlagsbelastung in unterschiedlicher Größenordnung. Dies ist in erster Linie durch die jeweilige Staffelung der Parameterwerte bedingt.

Bei relativ geringen Regenintensitäten resultieren vergleichsweise geringe Abweichungen, da das Versickerungsvermögen bei fast allen Modellierungsvarianten höher oder nur geringfügig niedriger als die Niederschlagsbelastung ist. Bei höheren Regenintensitäten macht sich dagegen die unterschiedliche Staffelung der Parameterwerte stark bemerkbar. Durch den Ansatz gestaffelter Parameterwerte werden im Vergleich zum flächengewichteten Mittelwert des Versickerungsvermögens sowohl deutlich niedrigere als auch deutlich höhere Versickerungskapazitäten in Rechnung gestellt. Die geringeren Versickerungskapazitäten auf einem Teil der Fläche werden jedoch nicht bei allen Beregnungsintensitäten von den höheren Versickerungskapazitäten der anderen Flächenteile kompensiert, da dort das Versickerungsvermögen erst bei sehr hohen Regenintensitäten ausgeschöpft wird. Für den betrachten Belagstyp des fugenarmen Standardpflasters ergeben sich die größten Abweichungen bei Regenintensitäten von 100 l/(s·ha) bis 250 l/(s·ha), also in einem aus stadthydrologischer Sicht besonders relevanten Intensitätsspektrum.

Bei pauschalem Ansatz von nur einem (mittleren) Parametersatz ergeben sich im Vergleich zur sehr detaillierten Modellabbildung für die betrachteten Blockregenbelastungen Abweichungen zwischen den Abflussvolumina sowie zwischen den Abflussspitzen von über 50%.¹⁹⁹ Wird der Flächenbelag in zwei oder drei fiktive Flächenanteile mit entsprechend gestaffelten Parameterwerten untergliedert, resultieren bereits deutlich geringere Abweichungen von unter 20%. Zwischen den beiden Modellierungsvarianten mit Differenzierung in fünf und zehn Flächensegmente ergeben sich lediglich sehr geringe Abweichungen zwischen den Abflusskennwerten von unter 5%.

Für die vier exemplarisch betrachteten Einzelereignisse variabler und z.T. hoher Regenintensität sind für das Abflussvolumen insgesamt größere und für die

¹⁹⁹ Teilweise resultieren auch Abweichungen von 100%. Dies ist immer dann der Fall, wenn die eine Modellierungsvariante einen Abfluss liefert, die andere jedoch nicht. Im vorliegenden Beispiel ist dies bei Regenintensitäten ≤ 100 l/(s·ha) zu beobachten.

Abflussspitze etwas geringere Differenzen zu beobachten.²⁰⁰ Die Einzelereignisse bestätigen jedoch insgesamt die Auswirkung der unterschiedlichen Modellierungsvarianten.

Für Flächenbeläge aus Rasen- und Porenbetonpflaster, denen ein entsprechend höheres Versickermögen als dem hier dargestellte Belagstyp des fugenarmen Funktionspflasters zugesprochen werden, ergeben sich prozentuale Differenzen ähnlicher Größenordnung bei insgesamt jedoch deutlich geringeren Abflussbeiträgen. Für die herkömmliche undifferenzierte Flächenabbildung ergeben sich insgesamt ausgeprägtere Abweichungen, für die Berechnungsvarianten mit stärkerer Flächendifferenzierung insgesamt geringere Abweichungen zur Basisvariante mit sehr fein diskretisierter Staffelung der Parameterwerte (Variante D10). Die zugehörigen Ergebnisdarstellungen sind im Anhang enthalten.

Darüber hinaus zeigt sich, dass durch die Staffelung des Versickerungsvermögens im Modell rechnerisch ein mit der Niederschlagsintensität ansteigendes Versickerungsvermögen erzielt wird.²⁰¹ Wie beschrieben führt die Staffelung dazu, dass bei einer bestimmten Niederschlagsbelastung ein Teil der Fläche bereits einen Oberflächenabfluss liefert, während bei anderen Flächenteilen das Versickerungsvermögen noch nicht erschöpft bzw. weitaus weniger ausgereizt ist. Damit wird rechnerisch der gleiche Effekt erzeugt, der prinzipiell auch in der Realität sowohl lokal als auch bezogen auf den Belagstyp zu beobachten ist.

Es wird daher gefolgert, dass durch eine Staffelung der Parameterwerte im Versickerungsansatz nach Horton/Paulsen entsprechend ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit das Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen wesentlich realitätsnäher abgebildet werden kann. Eine fiktive Untergliederung in maximal fünf gleichgroße Flächensegmente erscheint hierbei ausreichend. Umgekehrt steigt dagegen mit zunehmender Pauschalisierung die Gefahr, den Abflussbeitrag der betrachten Flächenbefestigung zu unterschätzen. Besonders ausgeprägt ist dies bei der bislang gängigen Anwendungsweise des Ansatzes von Horton/Paulsen.

Neben der Betrachtung von Einzelereignissen wurden für die genannten Einheitsflächen Langzeitsimulationen mit Niederschlagsreihen über einen Zeitraum von 44 Jahren durchgeführt. Hierbei wurden wiederum die fünf Modellierungsvarianten mit unterschiedlichen Flächendifferenzierungen verwendet.

Die Langzeitsimulationen dienten in erster Linie dazu, Jahresabflussbilanzen der verschiedenen Flächentypen zu generieren. Das Retentionsvermögen wasserdurchlässiger Pflasterbauweisen wird überwiegend – wie auch im Rahmen der

²⁰⁰ siehe Abbildung A - 59 und Abbildung A - 60 im Anhang

²⁰¹ siehe Grafik unten links in Abbildung 107

vorliegenden Arbeit – im Hinblick auf Starkregenereignisse betrachtet und beprobt. Über die Größenordnung ihrer Abflussanteile am Jahresniederschlag liegen dagegen nur sehr wenige Zahlenwerte vor. Diese sind jedoch im Kontext verschiedener Fragestellung wie der großräumigen Wasserhaushaltsanalyse oder der Gebührenerhebung zur Entsorgung des Regenwassers von Interesse. Durch die Anwendung des urbanhydrologischen Modells erwin 4.0 wurden daher Näherungswerte flächentypspezifischer Jahresabflussbeiwerte ermittelt. Dabei wird insbesondere den Berechnungsergebnissen bei sehr hoher Flächendifferenzierung eine hohe Aussagekraft zugesprochen.

Durch die Betrachtung verschiedener Niederschlagsreihen wurde darüber hinaus analysiert, welchen Einfluss die Jahresniederschlagshöhe auf den rechnerischen Jahresabflussbeiwert hat. Die vier betrachteten Zeitreihen der rheinlandpfälzischen Orte Bad Kreuznach, Kaiserslautern Pirmasens und Birkenfeld repräsentieren Örtlichkeiten mit unterschiedlichem Jahresniederschlagsgeschehen, das sich in mittleren jährlichen Niederschlagshöhen von 532-1010 mm ausdrückt.

Die Simulationsergebnisse für den konventionellen fugenarmen Pflasterbelag sind in Abbildung 109 aufgeführt. In der Grafik sind die rechnerischen Jahresabflussbeiwerte aus allen vier Niederschlagsreihen und bei allen Berechnungsvarianten einander gegenüber gestellt.





Die Berechnung bei sehr detaillierter Staffelung der Versickerungsparameter liefert für alle betrachten Orte bzw. Jahresniederschlagshöhen die mit Abstand höchsten Jahresabflussbeiwerte. Im Vergleich zur pauschalen Modellierung liegen

²⁰² ohne Drainageabflüsse

die Werte um etwa einen Faktor zehn höher. Dennoch erscheinen diese Werte am verlässlichsten, da hier das geringe Versickerungsvermögen von stärker kolmatierten Flächen bzw. Flächenbereichen besser erfasst ist. Dies ist in Bezug auf die Betrachtung des Niederschlagsgeschehens im Jahresverlauf, bei dem Regenintensitäten von ≤ 25 l/(s·ha) rd. 80% der Jahresniederschlagshöhe bilden, von wesentlicher Bedeutung. Mit zunehmend pauschalerer Flächenmodellierung tragen dagegen nur die Oberflächenabflüsse bei zunehmend höheren Regenintensitäten zum Jahresabflussvolumen bei. Dies entspricht jedoch nicht den Beobachtungen an Bestandsflächen.

Insgesamt resultieren dennoch für das betrachtete fugenarme Normalpflaster ausschließlich Abflussbeiwerte von unter 0,10. Ein Einfluss der mittleren jährlichen Niederschlagshöhe auf die Größe der rechnerischen Abflussbeiwerte ist dabei nicht zu erkennen. Daraus wird gefolgert, dass – unabhängig von Örtlichkeit und Jahresniederschlagshöhe – auf Siedlungsflächen aus konventionellem fugenarmem Pflaster rd. 90% des jährlichen Niederschlages zurück gehalten wird und lediglich 10% dem jeweiligen Entwässerungssystem zu fließen.

Für die stärker durchlässigen Flächentypen wie Sickerfugenpflaster, Porenbetonpflaster oder Rasenpflaster resultieren Jahresabflussbeiwerte von unter 0,02. Auf eine grafische Darstellung der Ergebniswerte wird an dieser Stelle verzichtet.

5.3.4 Vergleichssimulationen für reale und fiktive Einzugsgebiete

Im Rahmen der Einheitsflächenbetrachtung stand die Modellierung des Versickerungsverhaltens einzelner Belagsarten im Vordergrund. Dabei hat sich gezeigt, dass durch einen Ansatz nach Auftretenswahrscheinlichkeit gestaffelter Versickerungsleistungen das prinzipielle Versickerungsverhalten besser nachgebildet werden kann. Anhand von urbanhydrologischen Vergleichssimulationen an ganzen Einzugsgebieten wurde nun überprüft, in welchem Maße sich die bessere Abbildung wasserdurchlässig befestigter Gebietsflächen im realen Anwendungsfall nieder schlägt.

Als Anwendungsbeispiel wurde das knapp 30 ha große Campusgelände der Technischen Universität Kaiserslautern ausgewählt, das ein abgegrenztes entwässerungstechnisches Teilgebiet des Entwässerungssystems der Stadt Kaiserslautern darstellt (Abbildung 110). Undurchlässige Dach- und Straßenflächen nehmen ca. 30% des kanalisierten Einzugsgebiets ein. Unbefestigte Grünflächen, die potenziell einen Abflussbeitrag zum Entwässerungssystem liefern können, umfassen rd. 25% des Einzugsgebietes. Durchlässig befestigte Flächen bilden knapp 45% des kanalisierten Einzugsgebiets. Dieser vergleichsweise hohe Anteil resultiert aus den zahlreichen Parkplätzen und den großflächigen Wegenetzen auf dem Campusgelände. Konventionelle Pflasterbeläge aus fugenarm verlegten Rechteck- und Verbundpflaster dominieren hierbei. Stärker durchlässig Flächenbeläge sind nur vereinzelt zu finden und nehmen einen verschwindend geringen Flächenanteil ein.



Abbildung 110: Campusgelände der TU Kaiserslautern aus der Vogelperspektive

Das Einzugsgebiet untergliedert sich in sieben hydrologische Teilgebiete. Die längste Fließzeit im Gebiet beträgt ca. zehn Minuten. Am Endpunkt des Gebietes ist ein Regenrückhaltebecken mit einem Speichervolumen von rd. 8.200 m³ angeordnet. Ein Systemplan des Einzugsgebietes ist im Anhang dargestellt.

Für das Einzugsgebiet wurden Vergleichsrechnungen mit ähnlichen Niederschlagsbelastungen wie schon bei der Einheitsflächensimulation durchgeführt. Wiederum wurden 20-minütige Blockregen mit Intensitäten von 25 l/(s·ha) bis 500 l/(s·ha) und vier natürliche Starkregenereignisse betrachtet.

Analog der Einheitsflächenbetrachtung wurden wiederum die fünf Modellierungsvarianten mit unterschiedlich starker Diskretisierung der durchlässig befestigten Teilflächen und entsprechender Staffelung der Versickerungsparameter untersucht. Jedes hydrologische Teilgebiet wurde hierzu zunächst in drei generelle Flächenkategorien unterteilt: Dach- und Straßenflächen, durchlässig befestigte Flächen sowie unbefestigte Flächen. Während Dach- und Straßenflächen sowie die unbefestigten Flächen pauschal im Modell abgebildet wurden, wurden die durchlässig befestigten Flächen je nach Modellierungsvariante in 1-10 Teilflächen untergliedert. Den einzelnen Teilflächen wurden die Versickerungsparameter gemäß Tabelle 24 zugeordnet. Dabei entfallen auf die Kategorie der durchlässig befestigten Flächen ausschließlich fugenarme Pflasterbeläge aus konventionellem Funktionspflaster. Die geringen Flächenanteile stärker durchlässiger Flächenanteile wurden vereinfachend gemeinsam mit den abflusswirksamen unbefestigten Flächen erfasst.

Die Berechnungsergebnisse, die sich aus den unterschiedlichen Modellierungsvarianten für die betrachteten Blockregenbelastungen ergeben, sind in den beiden nachstehenden Diagrammen einander gegenüber gestellt. Abbildung 111 zeigt die prozentualen Abweichungen der rechnerischen Abflussvolumina im Vergleich zur Modellierungsvariante mit dem höchsten Differenzierungsgrad. Abbildung 112 zeigt eine analoge Gegenüberstellung für die rechnerischen Abflussspitzen.









Aufgrund der Überlagerung mit den Abflussbeiträgen der undurchlässig befestigten Flächenanteile, die bei allen Berechnungsszenarien gleichermaßen enthalten sind, fallen die Differenzen aus der unterschiedlichen modelltechnischen Abbildung der durchlässig befestigten Flächenanteile erwartungsgemäß kleiner aus als bei der Einheitsflächenbetrachtung. Dennoch zeigen sich auch für das reale Einzugsgebiet erhebliche Abweichungen zwischen den Berechnungsergebnissen. Insbesondere zwischen dem herkömmlichen Ansatz mit pauschaler Abbildung der durchlässig befestigten Flächen und dem Ansatz mit einer sehr starker Differenzierung in je zehn unterschiedlich durchlässige Flächensegmente weichen die berechneten Abflusskennwerte um bis zu 30% voneinander ab. Bereits ab einer einfachen Diskretisierung in zwei unterschiedlich durchlässige Flächenanteile ergeben sich bereits deutlich geringe Differenzen von maximal 10%. Diese Größenordnungen ergeben sich auch für die betrachteten Einzelereignisse, wobei dort die Abweichungen bei den rechnerischen Abflusspitzen etwas höher ausfällt als bei den Abflussvolumina.

Die Vergleichssimulationen untermauern damit auch für ein reales Einzugsgebiet das klare Defizit der herkömmlichen Berechnungsweise nach Horton/Paulsen, bei der allein durch die mangelnde Erfassung der Variabilität des Versickermögens nennenswerte Ungenauigkeiten in der Berechnung resultieren können, da die Abflussbeiträge durchlässig befestigter Flächen tendenziell unterschätzt werden. Bei praktischen Modellanwendungen wird dies häufig dadurch kompensiert, dass nicht an das Entwässerungssystem angeschlossene Einzugsgebietsflächen²⁰³ als abflusswirksam bewertet und entsprechend im Modell abgebildet werden.

In Ergänzung zu den Vergleichssimulationen an dem realen Einzugsgebiet des Universitätsgeländes von Kaiserslautern wurden noch weitere Vergleichssimulationen an fiktiven Einzugsgebieten durchgeführt, die sich durch unterschiedliche Anteile an undurchlässigen und durchlässigen Flächenbefestigungen unterscheiden. Hierzu wurde das reale Basissystem entsprechend modifiziert. Der Anteil an durchlässig befestigten Flächen wurde dabei sowohl reduziert als auch erhöht. Zudem wurden höhere Anteile an besonders stark durchlässigen Flächenbefestigungen integriert.

Bei zunehmendem Anteil an undurchlässigen Flächen nehmen die Ergebnisdifferenzen aus den unterschiedlichen Modellierungsvarianten erwartungsgemäß ab. Dennoch resultieren auch dann noch nennenswerte Abweichungen zwischen den Berechnungsvarianten mit pauschaler und nach Auftretenswahrscheinlichkeit gestaffelter Versickerungsparameter. Generell bestätigen sich damit auch für die

²⁰³ Hier wird also die Ungenauigkeit der Prozessbeschreibung durch die Ungenauigkeit der Flächenerfassung bzw. -bewertung ausgeglichen.

verschiedenen fiktiven Einzugsgebiete die Ergebnisse aus der Simulation der Einheitsflächen.

Für inhomogen zusammengesetzte Gebiete mit nennenswerten Anteilen von mäßig durchlässigen als auch von stark durchlässigen Flächenbelägen ergeben sich bei pauschaler Abbildung aller durchlässigen Flächen in einer gemeinsamen Flächenkategorie mit entsprechend gemittelten Versickerungsparametern ebenfalls z.T. sehr große Abweichungen im Vergleich zur separaten und/oder differenzierten Erfassung im Modell. Hier machen sich die gleichen Mechanismen bemerkbar wie bei den unterschiedlichen Modeliierungsvarianten bei der Simulation der Einheitsflächen sowie des realen Einzugsgebietes.

5.3.5 Fazit und Schlussfolgerungen aus den Vergleichssimulationen

Obwohl die Simulationen nur einen relativen Vergleich zwischen verschiedenen Berechnungsszenarien, nicht aber einen Abgleich mit Messwerten zulassen, liefern sie Gewinn bringende Erkenntnisse. In den Vergleichssimulationen an Einheitsflächen hat sich zum einen die prinzipielle Konsistenz zwischen den empfohlenen Parameterwerten des herkömmlichen Horton-Ansatzes und den empfohlenen bauartspezifischen Abflussbeiwerte grundsätzlich bestätigt. Es hat sich aber auch gezeigt, dass die urbanhydrologische Simulation des Versickerungsverhaltens durchlässig befestigter Siedlungsflächen mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist. Die Wahl adäquater Berechnungsparameter fällt angesichts der beträchtlichen Variabilität der belagsspezifischen Versickerungsleistungen immer noch sehr schwer.

Durch den Ansatz nach Auftretenswahrscheinlichkeit gestaffelter Parameterwerte konnten dagegen sowohl bei der Simulation von Einheitsflächen als auch eines kleinen realen Einzugsgebietes ermutigende Berechnungsergebnisse erzielt werden. Bei dieser Vorgehensweise werden die durchlässig befestigten Flächen in flächengleiche Segmente unterteilt und den einzelnen Segmenten Versickerungsleistungen zugeordnet, wie sie sich aus der Häufigkeitsverteilung in Abbildung 97 bzw. in Tabelle 16 ergeben. Eine Differenzierung in drei bis fünf unterschiedlich durchlässige Flächensegmente erscheint dabei i.d.R. ausreichend.

Durch die Staffelung des Versickerungsvermögens werden gleich mehrere Vorteile erzielt. Zum einen wird der stochastische Charakter des Versickerungsvermögens in guter Näherung erfasst. Darüber hinaus wird das Versickerungsverhalten wesentlich realitätsnäher abgebildet, da durch die Staffelung der Effekt einer mit der Niederschlagsintensität ansteigenden Infiltrationskapazität erzielt wird. Gleichzeitig werden jedoch auch die bereits bei Regen vergleichsweise schwacher Intensität zu beobachtenden Oberflächenabflüsse von stärker kolmatierten Flächenanteilen im Modell abgebildet. Dabei wird unterstellt, dass je Standort bzw. betrachtetem Teilgebiet die gleiche Variabilität im Versickerungsvermögen vorliegt, wie sie für den jeweiligen Flächentyp insgesamt vorzufinden ist. Bezogen auf eine konkrete Einzelfläche bzw. ein einzelnes Teilgebiet ist diese Annahme sicherlich mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Umgekehrt wird dadurch allerdings auch sicher gestellt, dass bei konsequenter Umsetzung dieser Vorgehensweise über ganze Einzugsgebiete hinweg das Versickerungsvermögen der durchlässig befestigten Siedlungsflächen – in der Summe der Einzelflächen – wesentlich zutreffender und auch zuverlässiger als bislang erfasst und abgebildet wird. Geeigneter Weise sollte daher die Möglichkeit zur Staffelung der Parameterwerte in die gängigen Berechnungsprogramme implementiert werden.

6 Konzeption eines verbesserten urbanhydrologischen Modellbausteins

Der bislang meist verwendete Modellansatz nach Horton zur Simulation des Abflussbeitrages durchlässig befestigter Siedlungsflächen ist nicht in der Lage, das Versickerungsverhalten von durchlässig befestigten Siedlungsflächen sachgerecht abzubilden. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit versucht, aus der umfangreichen Datenbasis und den daraus gewonnen Erkenntnissen ein verbessertes Konzept zur mathematischen Beschreibung des Abfluss- und Versickerungsverhaltens abzuleiten.

Anvisiert wurde dabei ein Modellbaustein, der in der Lage ist, die maßgeblichen physikalischen Prozesse mit einer höheren Genauigkeit und Wirklichkeitsnähe als die bislang verfügbaren Berechnungsmethoden abzubilden. Dennoch soll er möglichst leicht bestimmbare Berechnungsparameter verwenden, mit möglichst geringem Rechenaufwand verbunden und in die gängigen urbanhydrologischen Softwarepakete implementierbar sein, um eine praktikable Anwendung zu ermöglichen. Zielsetzung war es dabei nicht, eine Berechnungssoftware zu erstellen, sondern lediglich eine Modellkonzeption, die als Grundlage einer späteren programmtechnischen Umsetzung dienen könnte.

6.1 Grundkonzept des Modellbausteins

Aus den Ergebnissen der Feld- und Labormessungen sowie der numerischen Strömungssimulationen 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 bei eingestauter 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 einer teildurchlässigen Deckschicht und einer volldurchlässigen Pflasterunterlage (Bettungs- und Tragschicht) zusammen setzt, die auf einem mehr oder minder durchlässigen Planum aufliegt. Dabei berücksichtigt das Modellkonzept die wesentlichen Einzelprozesse einschließlich ihrer zeitlichen Abfolge und kann daher als empirisch-deterministischer Modellansatz bezeichnet werden. Ein Schema des Schichtenmodells mit seiner zwei-direktionalen Prozesskette ist in Abbildung 113 dargestellt.



Abbildung 113: Schema des bi-direktionalen Schichtenmodells

Der Niederschlag stellt den Input zum System dar. Ein Teil des Niederschlages benetzt die Oberfläche und füllt Bodenvertiefungen auf, bevor ein oberflächiger Abfluss oder eine Infiltration in den Oberbau der Flächenbefestigung erfolgen kann. Dieser Niederschlagsanteil wird im Modellkonzept als Anfangverlust bilanziert (Oberflächenmodul). Die Regeneration des Verlustpotenzials in der Trockenphase wird konventionell, wie in Kap. 5.2 beschrieben, berechnet.²⁰⁴

Den Kern des Modellkonzepts bildet ein Infiltrationsmodul, mit dem das Versickerungsvermögen der wasserdurchlässigen Deckschicht in Abhängigkeit von Niederschlagsintensität, Kolmationsgrad und Zeit mathematisch beschrieben

²⁰⁴ siehe auch Empfehlungswerte flächentypspezifischer Anfangsverlusthöhen in Tabelle A - 21

wird. Zur Modellierung des Versickerungsverhaltens wurden zwei alternative Berechnungsalgorithmen entwickelt, die nachfolgend näher erläutert werden. Durch eine flächengewichtete Staffelung der Modellparameter kann dabei auch näherungsweise die stochastische Variabilität des Versickerungsvermögens modelltechnisch erfasst werden. Die Niederschlagsmenge, die das aktuelle Infiltrationsvermögen übersteigt, stellt den Oberflächenabfluss dar und verlässt als Output das Berechnungssystem.

Die Speicherwirkung der Tragschicht wird durch ein einfaches Speichermodell beschrieben (Kapitel 6.3). Hierbei werden 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. Auch wenn dieser Fall relativ selten eintreten mag, sollte er dennoch im Modell abgebildet werden können, um die vollständige Prozesskette zu erfassen. Insbesondere im Zuge der Betrachtung von Überstau- und Überflutungsvorgängen bei selten eintretenden Ereignissen oder bei besonderen örtlichen Gegebenheiten kann dieser Aspekt an Relevanz gewinnen.

Das Schichtenmodell ist damit insgesamt in der Lage, die wesentlichen Charakteristika des Abfluss- und Versickerungsverhaltens durchlässig befestigter Siedlungsfläche sachgerecht abzubilden und stellt im Vergleich zu bisherigen Modellkonzepten eine nennenswerte Verbesserung dar.

6.2 Infiltrationsmodul

Die Abflussbildung auf wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen wird ganz wesentlich vom aktuellen Infiltrationsvermögen der Fläche bestimmt. Die Infiltrationsrate ist hierbei u.a. von der Konstruktion und dem Zustand der Fläche als auch von der aktuellen Niederschlagsintensität abhängig. Zur modelltechnischen Nachbildung des Versickerungsverhaltens wurden zwei prinzipiell unterschiedliche Berechnungsansätze entwickelt. Bei dem einen Berechnungsansatz erfolgt die Erfassung des Versickerungsverhaltens über eine differenzierte Umsetzung des konventionellen Ansatzes nach Horton/Paulsen. Der Ansatz hat sich als äußerst effektiv erwiesen und wird daher ausdrücklich zur weiteren programmtechnischen Umsetzung empfohlen. Der zweite Ansatz beschreibt das Versickerungsvermögen unmittelbar in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität und der Niederschlagsdauer über einen Berechnungsalgorithmus, der durch Regressionsanalysen aus den Messdaten der Laborversuche abgeleitet wurde. Er weist gegenüber dem modifizierten Ansatz nach Horton/Paulsen gewisse Nachteile auf und bedarf noch weiter gehender Entwicklungsarbeit. Er ist im Anhang dokumentiert.

Bereits im Zuge der urbanhydrologischen Vergleichssimulationen konnte gezeigt werden, dass durch eine weiter gehende Diskretisierung der Berechnungsflächen und den Ansatz nach der Auftretenswahrscheinlichkeit gestaffelter Parameterwerte im Berechnungsansatz nach Horton/Paulsen das prinzipielle Versickerungsverhalten besser nachgebildet werden kann.²⁰⁵

Bei dem modifizierten Berechnungsansatz werden die jeweils im Modell abzubildenden durchlässig befestigten Flächen fiktiv in eine bestimmte Anzahl von Flächensegmenten untergliedert. Den einzelnen Flächensegmenten werden Versickerungsparameter zugeordnet, die der statistischen Unterschreitungshäufigkeit des Versickerungsvermögens entsprechen. Die nach der Auftretenswahrscheinlichkeit gestaffelten Parameterwerte spiegeln auf diese Weise die generelle wie auch die kleinräumige Variabilität des Versickerungsvermögens wieder.²⁰⁶ Die Berechnungsflächen sollten hierbei in mindestens drei, besser jedoch fünf oder gar zehn Flächensegmente diskretisiert werden, um insbesondere die Abflussbeiträge bei Niederschlägen geringer bis mäßiger Intensität adäquat wieder zu geben. Das Prinzip der gestaffelten Parameterwerte ist für verschiedene Diskretisierungsstufen in Abbildung 114 veranschaulicht.



Abbildung 114: Staffelung der Versickerungsparameter entsprechend ihrer Auftretenshäufigkeit bei unterschiedlichen Diskretisierungsstufen

siehe Kapitel 5.3.3

²⁰⁶ Grundsätzlich wäre auch eine analoge Staffelung der Parameterwerte für der Regressionsund die Regenerationskonstante möglich.

Die Berechnung der Versickerungsverluste der einzelnen Flächensegmente erfolgt jeweils durch Anwendung des konventionellen Berechnungsansatzes nach Horton/Paulsen. Anschließend werden die segmentweisen Versickerungsverluste je Berechnungsschritt zum Versickerungsverlust der Berechnungsfläche aufaddiert.

Mit der Staffelung der Parameterwerte wird erreicht, dass auch rechnerisch das stochastisch geprägte Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Sieldungsflächen und die daraus resultierende extreme Variabilität der Versickerungsleistung näherungsweise erfasst werden. Gleichzeitig wird das mit der Niederschlagsintensität ansteigende Versickerungsvermögen ebenso im Modell wieder gegeben, wie das Aufkommen von geringen Oberflächenabflüssen bereits bei vergleichsweise intensitätsschwachen Regenereignissen. Bei der Wahl der jeweiligen Versickerungsparameter kann sich an den in Kapitel 4.6 genannten Zahlenwerten orientiert werden.

Die Abhängigkeit der Versickerungsrate vom Oberflächengefälle wird in dem Berechnungsansatz nicht explizit berücksichtigt, kann aber durch entsprechende Anpassung der Modellparameter erfasst werden. Auf der Basis der im Rahmen dieser Arbeit analysierten Messungen wurden die in Tabelle 25 aufgeführten pauschalen Abminderungsfaktoren ζ_J formuliert, mit denen die Basisparameter je nach vorliegendem Flächengefälle und Kolmationsgrad multipliziert werden können.

Gefälle	Neuzustand	mäßige Kolmation	ausgeprägte Kolmation	starke Kolmation
≤ 2,5%	1,15	1,10	1,05	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

Tabelle 25:Abminderungsfaktoren ζ₃ der Infiltrationsrate in Abhängigkeit vom
Oberflächengefälle

Der Vorteil des Berechnungsansatzes liegt neben der deutlich besseren Beschreibung des Versickerungsverhaltens darin, dass er mit der Anfangs- und der Endversickerungsrate anschauliche, dem Modellanwender vertrauter Parameterwerte verwendet, die unmittelbar den Häufigkeitsverteilungen der flächentypspezifischen Versickerungsleistungen entnommen werden können. Darüber hinaus ist der Ansatz vergleichsweise einfach umsetzbar und nur mit einem geringen zusätzlichen Rechenaufwand verbunden, der angesichts der heute verfügbaren Rechnerleistungen keine Hürde darstellt. Er erfüllt damit voll und ganz die zu Beginn der Arbeit formulierten Anforderungen.

Prinzipiell ist die Anwendung der vorgeschlagene Diskretisierung der Berechnungsflächen in Segmente unterschiedlichen Versickerungsvermögen auch mit den herkömmlichen Berechnungsmodellen möglich. Die praktische Umsetzung ist jedoch sehr mühsam und führt schnell zu unübersichtlichen und schwer händelbaren Datenmodellen. Die Flächendiskretisierung erfolgt daher geeigneter Weise entsprechend automatisiert direkt im Berechnungskern des Simulationsmodells, wobei die Diskretisierung sowie die gewählten Parameterwerte in einer entsprechenden Parametermatrix vom Anwender vorgebbar sein sollten.

6.3 Speichermodell

Das im Modellkonzept vorgesehene Speichermodell arbeitet mit deutlich weniger Parametern als die Infiltrationsmodelle. 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 in der Regel 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)
∆t:	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 umgesetzt werden. Die Aufgabe des Speichermodells besteht allerdings lediglich darin, die Infiltrationsrate im Falle einer Sättigung der Tragschicht auf die hydraulische Leitfähigkeit des Planums zu begrenzen. Diese Bedingung ist entsprechend in den Berechnungsgang zu implementieren. Gleichwohl reicht die vereinfachte Methodik sicher aus, um die Speicherwirkung der Tragschicht und den Effekt eines gesättigten Oberbaus mit angemessener Genauigkeit nachbilden zu können.

7 Zusammenfassung und Fazit

Planer von Entwässerungssystemen werden zukünftig gefordert sein, das Abfluss- und Versickerungsverhalten unbefestigter und durchlässiger befestigter Flächen innerhalb von Siedlungsgebieten stärker als bislang 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 der physikalischen Abfluss- und Versickerungsprozesse deutlich zu erweitern und besser geeignete Methoden zu deren rechnerischer Nachbildung zu entwickeln. Die vorliegende Forschungsarbeit versucht einen Beitrag hierzu zu leisten.

Im ersten Teil der Arbeit wurden die wissenschaftlichen Grundlagen und insbesondere der bisherige Kenntnisstand zum Versickerungsverhalten wasserdurchlässiger Flächenbeläge zusammengetragen (Teil A). Die Synthese der in der Fachliteratur dokumentierten Erkenntnisse wurde ausführlich dargestellt und erörtert. Darauf aufbauend wurde das Versickerungsverhalten anhand der Ergebnisse von Abfluss- und Infiltrationsmessungen an Bestandsflächen, von Beregnungsversuchen an einer Lysimeteranlage unter Laborbedingungen sowie von numerischen Strömungssimulationen eingehend analysiert (Teil B).

Anhand der rd. 90 durchgeführten Infiltrometermessungen wurden Kenntnisse zum Versickerungsvermögen verschiedener Belagstypen im Gebrauchszustand gesammelt. Die Ergebnisse repräsentieren den nutzungsbedingten Rückgang der Versickerungsleistung durch vielfältige Einflussfaktoren wie bspw. den Eintrag von Feinpartikeln in die Fugen (Kolmation) oder die sukzessive Nachverdichtung des Oberbaus infolge verkehrlicher Nutzung (Kap. 4.1). Die Messergebnisse wurden zudem mit den Ergebniswerten anderer Forschergruppen in einem Datenpool überlagert und statistisch ausgewertet. Hierbei wurde der Einfluss wesentlicher baulicher und standortspezifischer Randbedingungen auf das Versickerungsvermögen analysiert und quantifiziert (Kap. 4.2). Darüber hinaus konnten für zahlreiche Belagsarten Häufigkeitsverteilungen des Versickerungsvermögens generiert werden. Mit ihnen kann der ausgeprägte stochastische Charakter der Versickerungsverhaltens, der sich in einer enormen Variabilität des Versickerungsvermögens äußert, in einer ersten Näherung quantitativ umschrieben werden. Weitere Erkenntnisse zum Versickerungsphänomen und maßgeblichen die Versickerungsleistung bestimmenden Einflussfaktoren wurden durch die Analyse von Abflussmessungen auf einem Versuchsfeld in Lingen (Ems) gesammelt. Hierbei konnte insbesondere der Einfluss der Niederschlagsbelastung sowie verschiedener baulicher Randbedingungen wie Gefälle, Materialeigenschaften der mineralischen Baustoffe und Planumsdurchlässigkeit analysiert und bewertet werden (Kap. 4.3).

Im Rahmen von Laborversuchen an einer Lysimeteranlage konnten die hydrologischen und bodenhydraulischen Prozesse, die auf bzw. in der Pflasterkonstruktion ablaufen, beobachtet und analysiert werden. In rund 140 Beregnungsversuchen wurden insbesondere der Einfluss der Feinpartikeleintrages in die Deckschicht, der Niederschlagsbelastung und des Oberflächengefälles für verschiedene Pflaster- und Plattenbauweisen systematisch untersucht und quantifiziert (Kap. 4.4).

In Ergänzung zu den messtechnischen Beprobungen von Pflasterflächen in situ sowie im Labor wurden die Strömungsvorgänge im Pflasteraufbau mit Hilfe des numerischen Strömungsmodells HYDRUS-2D analysiert. Durch zahlreiche Vergleichssimulationen konnten die Ergebnisse der messtechnischen Beprobungen verifiziert und Detailphänomene analysiert und illustriert werden (Kap. 4.5). Hierbei konnte u.a. gezeigt werden, dass die ausgeprägte Abhängigkeit der Versickerungsleistung von der Niederschlagsintensität – neben der Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit des Fugenmaterials – auf den spezifischen Wasserhaushalt des porösen Feststoffmediums im Fugenraum und die ausgeprägten Wechselwirkungen zwischen der Fest- und Flüssigphase beim Wassertransportvorgang zurück zu führen sind. Darüber hinaus bestätigte sich in den Strömungssimulationen die weitgehende Entkopplung des Infiltrationsprozesses im Fugenraum von den bodenhydraulischen Zuständen in der Bettungs- und vor allem in der Tragschicht.

Auf der Basis der messtechnischen Beobachtungen und den weitreichenden Prozessanalysen wurde das Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen allgemein charakterisiert und anhand von flächentypspezifischen Kennwerten des Versickerungsvermögens auch zahlenmäßig bewertet. Die ausgewiesenen Kennwerte tragen hierbei dem Einfluss wesentlicher, das Versickerungsvermögen beeinflussender Randbedingungen wie Gefälle, Nutzung und Liegezeit Rechnung (Kap. 4.6). Mit den erarbeiteten Versickerungskennwerten wird eine deutlich verbesserte, sehr kompakte und zugleich durch umfangreiche Messungen und Analysen abgesicherte Grundlage zur quantitativen Bewertung des Versickerungsvermögens durchlässig befestigter Siedlungsflächen bereit gestellt, die in dieser Form bislang nicht verfügbar war.

Teil C der Arbeit widmet sich der urbanhydrologischen Quantifizierung des Versickerungsverhaltens. Hierbei wurden zunächst Empfehlungen für die stadt-

hydrologische Praxis aus den gewonnen Erkenntnissen abgeleitet. Die Anwendungsempfehlungen umfassen hierbei insbesondere Abflussbeiwerte zur konventionellen Erfassung des Abflussbeitrages von Siedlungsflächen (Kap. 5.1) sowie Parameterwerte zur Anwendung des Berechnungsansatzes nach Horton (Kap. 5.2). Dieser Ansatz stellt die dominierende Berechnungsmethode zur Abbildung des Versickerungsverhaltens wasserdurchlässiger Siedlungsflächen im Zuge von Niederschlags-Abfluss-Simulationen dar. Bislang lagen jedoch 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, was angesichts der zwischenzeitlich enorm gewachsenen Datengrundlage und des beträchtlich gestiegenen Kenntnisstandes jedoch nicht überraschen kann.

Anhand von urbanhydrologischen Vergleichssimulationen an Einheitsflächen sowie an fiktiven und realen Einzugsgebieten wurde die Umsetzung der formulierten Empfehlungen an verschiedenen Anwendungsfällen überprüft (Kap. 5.3). Dabei konnten u.a. die Konsistenz zwischen den verschiedenen Empfehlungswerten nachgewiesen und flächentypspezifische Jahresabflussbilanzen erstellt werden. Ferner konnte gezeigt werden, dass sich durch den Ansatz von nach Auftretenshäufigkeiten gestaffelten Parameterwerten das charakteristische Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen wesentlich realistischer im Modell nachbilden lässt.

Zum Abschluss der Arbeit wurde schließlich ein urbanhydrologischer Modellbaustein zur besseren modelltechnischen Erfassung des spezifischen Versickerungsverhaltens durchlässig befestigter Siedlungsflächen konzipiert (Kap. 6). Die Konzeption sieht ein empirisch-deterministisches Schichtenmodell vor, das sowohl die niederschlagsabhängige und stochastisch geprägte Infiltrationsleistung als auch die Speicherwirkung der Tragschicht berücksichtigt. Zur mathematischen Nachbildung des Versickerungsverhaltens wurden zwei alternative Berechnungsansätze entwickelt. Der erste Ansatz stellt eine Modifikation des konventionellen Ansatzes nach Horton/Paulsen dar, bei der die Berechnungsflächen in Teilflächen diskretisiert und mit nach Auftretenshäufigkeiten gestaffelten Parameterwerten verbunden werden. Der Ansatz hat sich als äußerst effektiv erwiesen und wird daher ausdrücklich zur weiteren programmtechnischen Umsetzung empfohlen. Der zweite Ansatz beschreibt das Versickerungsvermögen in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität und der Niederschlagsdauer über einen Regressionsansatz, erfordert allerdings noch weiter gehende Entwicklungsarbeit.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte eine Vielzahl gewinnbringender Erkenntnisse zur Charakterisierung und Quantifizierung des Versickerungsphänomens auf durchlässig befestigten Siedlungsflächen gewonnen und zur Ableitung substanzieller Anwendungsempfehlungen genutzt werden. Das Versickerungsvermögen der unterschiedlichen Pflasterbauweisen und seine Abhängigkeit von verschiedenen baulichen und nutzungsbedingten Einflussfaktoren wurden systematisiert und mit Kennwerten umschrieben. Vielfach konnten anhand der Messwertanalysen Erkenntnisse früherer Untersuchungen bestätigt und auf einer z.T. deutlich verbesserten Datengrundlage mit abgesicherten Zahlenwerten untermauert werden. Damit liefert die Arbeit eine signifikante Verbesserung des Kenntnisstandes zum Abfluss- und Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen. Der erreichte Kenntnisstand sollte in der Fachwelt diskutiert werden und Eingang in die technischen Regelwerke der Entwässerungsplanung sowie die planerische Praxis finden.

Darüber hinaus wurde ein erster Schritt zu einer verbesserten Modellierung des Abflussverhaltens versickerungsfähiger Siedlungsflächen getätigt. Die vorgeschlagenen Berechnungsansätze liefern ermutigende Simulationsergebnisse, müssen den Nachweis ihrer Tauglichkeit aber noch in der praktischen Erprobung erbringen. Dennoch sollte insbesondere der Ansatz nach Auftretenswahrscheinlichkeit gestaffelter Parameterwerte zukünftig eine breite Anwendung finden und in die gängigen urbanhydrologischen Berechnungsmodelle implementiert werden.

Es wurde ebenfalls dargelegt, dass insbesondere bezüglich der kleinräumigen physikalischen Prozesse bei der Infiltration von Regenwasser in die Deckschicht von Pflasterbelägen noch vielfältige Kenntnisdefizite herrschen. Zwar konnte das Phänomen des mit der Niederschlagsintensität ansteigenden Versickerungsvermögens im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstmals identifiziert und seine Ursachen eingegrenzt werden. Es bleibt jedoch offen, welcher Umstand die mit der Regenintensität steigenden Wassergehalte und -leitfähigkeiten letztlich bedingt und weshalb dieses Phänomen bei natürlichen Böden nicht zu beobachten ist. Ebenfalls unklar ist bislang der Zusammenhang zwischen dem Versickerungsvermögen und dem Ausmaß der Vorbefeuchtung einer Pflasterfläche. Weder im Rahmen der In-Situ-Messungen noch im Rahmen der Lysimeterversuche im Labor zeigte sich eine eindeutige und quantifizierbare Korrelation. Bei längeren Trockendauern wurden sowohl erhöhte als auch verminderte Versickerungsleistungen beobachtet. Eine kausale Beschreibung der Zusammenhänge ist insbesondere im Kontext von Kontinuumssimulationen des Niederschlagsabflussvorganges von Bedeutung.

Zur weiter gehenden Untersuchung der kleinräumigen Prozesse im Fugenraum sind ausgesprochen detaillierte bodenhydraulische Untersuchungen erforderlich, die sowohl umfangreiche Analysen der Materialeigenschaften als auch eine hochauflösende Erfassung von Wassergehalten, Saugspannungen und Potentialdifferenzen während Beregnungs- und Trockenphasen umfassen und messtechnisch nicht einfach zu realisieren sind. Unter Umständen kann hier eine noch detailliertere Nachbildung und Analyse der bodenhydraulischen Zustände mit Hilfe eines numerischen Strömungsmodells ergänzende Hinweise liefern. Hierzu sollte insbesondere der Eintrag von Feinpartikeln in die ersten 1-2 cm der Fugenfüllung auf der Basis messtechnisch erhobener Materialeigenschaften und in höherer räumlicher Auflösung abgebildet werden als dies im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt ist. Die Anwendung eines 3-dimensionalen Strömungsmodells sollte hierbei erwogen werden.

Neben den kleinräumigen Strömungsprozessen im Fugenraum besteht darüber hinaus ein weiterer Bedarf an Erhebungen zum Versickerungsvermögen auf Bestandsflächen, um die Datenbasis zur Ableitung von Häufigkeitsverteilungen kontinuierlich erweitern zu können. Eine Steigerung der Repräsentativität und der Aussagekraft der Häufigkeitsverteilungen ist insbesondere bei Plattenbelägen sowie bei stärker durchlässigen Pflasterbauweisen aus Sickerfugenbelägen oder Porenbetonsteinen angezeigt. Die statistischen Auswertungen sollten bei vorliegen weiterer Messergebnisse entsprechend fortgeschrieben werden.

Ähnliches gilt hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen dem Versickerungsvermögen und dem Oberflächengefälle durchlässig befestigter Siedlungsflächen. Hierzu liegen inzwischen erste Kennwerte vor. Dennoch sind ergänzende Untersuchungen zu sämtlichen Flächentypen mit einer feineren Diskretisierung der Gefällestufen wünschenswert. Diese Untersuchungen sollten sich nicht allein auf Laborversuche beschränken, sondern auch an Bestandsflächen durchgeführt werden.

Darüber hinaus liegen bislang nur sehr wenige Messergebnisse aus der Beprobung des Niederschlagsabflussgeschehens größerer Flächeneinheiten vor. Derartige Messungen wären – idealer Weise in Kombination mit punktuellen Infiltrationsversuchen – besonders geeignet, um die Abbildung der hydrologischen Prozesse in neu oder weiter entwickelten Berechnungsansätzen zu testen und zu bewerten. Auf diese Weise könnte zudem die Aussagekraft punktuell erhobener Versickerungsleistungen im Kontext des Abflussverhaltens einer größeren Flächeneinheit analysiert werden. Eine Absicherung der auf Punktmessungen basierenden Häufigkeitsverteilungen und Parameterempfehlungen ist angesichts ihrer Relevanz zu empfehlen.
8 Literatur

- Akan, A.O. (2003): Urban Stormwater Hydrology A Guide to Engineering Calculations, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, USA.
- Akan, A.O. und Houghtalen, R.J. (2003): Urban Hydrology Engineering Applications and Computer Modeling, John Wiley & sons, Hoboken, 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.
- BDB (1996): Richtlinie für die Herstellung und Güteüberwachung von wasserdurchlässigen Pflastersteinen aus haufwerksporigem Beton, Bundesverband Deutsche Betonund Fertigteilindustrie e.V., Bonn.
- 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.
- Berlekamp, L.-R. und Pranzas, N. (1992): Erfassung und Bewertung von Bodenversiegelungen unter hydrologisch-stadtplanerischen Aspekten am Beispiel eines Teilraums von Hamburg, Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg.
- 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.
- Borgwardt, S.; Gerlach A. und Köhler, M. (2001): Kommentierung des Merkblatts für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen. Fachvereinigung Betonprodukte für Straßen-, Landschafts- und Gartenbau (SLG), Bonn.
- Borgwardt, S.; Gerlach, A. und Köhler, M. (2000): Versickerungsfähige Verkehrsflächen -Anforderungen, Einsatz und Bemessung, Springer Verlag.
- Bosseler, B.; Homann, D. und Harting, K. (2004): Prüfanlage für wasserdurchlässige Flächenbeläge - Vergleichsprüfungen im Rahmen des Probebetriebes, Forschungsbericht (unveröffentlicht), IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen.
- Brattebo, B.O. und Booth, D.B. (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. Wat. Res., 37(18), 4369-4376.
- Breuste, J. (Hrsg.) (1996): Stadtökologie und Stadtentwicklung: Das Beispiel Leipzig Ökologischer Zustand und Strukturwandel einer Großstadt in den neuen Bundesländern, Angewandte Umweltforschung, Band 4, Analytica- Verlag, Berlin.
- Breuste, J.; Keidel, T.; Meinel, G.; Münchow, B.; Netzband, M. und Schramm, M. (1996): Erfassung und Bewertung des Versiegelungsgrades befestigter Flächen, UFZ-Bericht Nr. 12/1996, Zwischenbericht zum Forschungsprojekt, Nr. 19, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, ISSN 0948-9452.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1994): Bodenkundliche Kartierung,4. verbesserte und erw. Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Davies, J. W.; Pratt, C. J. und 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.
- Deutsches Institut für Normung e. V. DIN (1985): DIN 4045: Abwassertechnik Begriffe; Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- 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.
- 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.

- DWD (2005): Starkniederschlagshöhen für die Bundesrepublik, Deutschland KOSTRA-DWD-2000, Ausgabe 2005, Deutscher Wetterdienst, Offenbach/Main, und itwh, Hannover.
- Eppel, J. (2003): Versickerungsfähige Beläge Ein Beitrag zur Bodenentsiegelung, Veitshöchheimer Berichte aus der Landespflege; Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Nr. 72, 2003, S.29-32.
- Fach, S. (2006): Retentionswirkung und Stoffrückhalt von ausgewählten wasserdurchlässig befestigten Verkehrsflächen, Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft, Universität Essen, Heft 28.
- Ferguson, B. K. (2005): Porous Pavement, Integrative studies in water management and land development, CRC Press, Boca Raton, Florida, ISBN 978-0849326707.
- FGSV (1998): Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- Field R., Masters H. und Singer, M. (1982): An Overview of Porous Pavement Research, Water Resources Bulletin. Vol. 18, No. 2, S. 265-270.
- Flöter, O. (1996): Oberflächenversiegelung von Altlasten mit Verbundsystemen aus Pflasterbelägen auf tragfähigem und dichtwirksamem Ober- und Unterbau, Diplomarbeit im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg, veröffentlicht in Melchior, S. und Miehlich, G. (1996), Entwicklung und Bewertung alternativer Systeme zur Abdeckung von Altlasten, Abschlussbericht, Inst. f. Bodenkunde, Universität Hamburg.
- Flöter, O. (2006): Wasserhaushalt gepflasterter Straßen und Gehwege, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 58.
- Flühler, H. und Roth, K. (2003): Physik der ungesättigten Zone, Lehrmanuskript der ETH Zürich.
- Gerrits, C. and James, W. (2002): Restoration of infiltration capacity of permeable pavers, Proc. 9th International Conference on Urban Drainage. ASCE. Portland, O.R., USA.
- Hade, J.D. und Smith, D.R. (1988): Permeability of Concrete Block Pavements, Proc. 3rd International Conference on Concrete Block Pavements, Italy, S. 217-223.
- Hanses, U. et al (1999): Wasserdurchlässiges Pflaster auf gering durchlässigem Untergrund, TIS 4/99; S.61-69.
- Heber, B. et al. (1993): Stadtstrukturelle Orientierungswerte für die Bodenversiegelung in Wohngebieten, IÖR-Schriften, Institut für ökologische Raumentwicklung e.V., Dresden, Band 5.
- Heber, B. et al. (1996): Beschreibung und Bewertung der Bodenversiegelung in Städten, IÖR-Schriften, Institut für ökologische Raumentwicklung e.V., Dresden, Band 15.
- Hunt, W. F. III und Bean, E. Z. (2006): NC State University permeable pavement research and changes to the state of NC credit system, Proc. 8th Int. Conf. on Concrete Block Paving, November 6-8, 2006 San Francisco, California, USA (siehe auch http://www.bae.ncsu.edu/stormwater/).

- Hunt, W. F.; Stephens, S. und Mayes, D. (2002): Permeable Pavement Effectiveness in Eastern North Carolina. Proc. 9th International Conference on Urban Drainage. ASCE. Portland, O.R.
- IKT Institut für Unterirdische Infrastruktur (2005): DIBt-Zulassungsverfahren für Wasserdurchlässige Flächenbeläge – IKT nimmt Prüfungen auf, IKT-eNewsletter Februar 2005, URL: http://www.ikt.de.
- 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.
- 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.
- Kölbl, A. (2006): Angewandte Physik Bodenhydrologie; Lehrmanuskript der Technischen Universität München; http://www.wzw.tum.de/bk/.
- Krass, K., Radenberg, M und Buscham, B. (2007): Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von Pflasterflächen, unveröffentlichte Dokumentation der Untersuchungsergebnisse.
- Kresin, C. (1996): Infiltration through aging permeable paving, Master Thesis, School of Engineering, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada.
- Kresin, C.; James, W. und Elrick, D.E (1996): Observations of Infiltration Through Clogged Porous Concrete Block Pavers. Chapter 10 in Advances in Modeling the Management of Stormwater Impacts, Vol. 5. Published in Proc. of the Stormwater and Water Quality Management Modeling Conference, Toronto, ON, February 22-23, 1996.
- Kretzer, H. und Ruiz-Rodriguez, E. (1992): Tropfinfiltrometer für befestigte und unbefestigte Flächen, Wasser und Boden, 44 (1992), S. 805 - 807.
- Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2000): Niederschlagsreihen für die Langzeitsimulation, Heft Nr. 14, Siedlungswasserwirtschaft.
- Maidment, D. R. (1993): Handbook of Hydrology; McGraw-Hill Professional.
- Maniak, U. (1993): Hydrologie und Wasserwirtschaft Einführung für Ingenieure, 3. Auflage, Springer-Verlag.
- Münchow, B. (1999): Bodenbeanspruchung durch Versiegelungsmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung der Wasserdurchlässigkeit und der bodenbiologischen Aktivität, UFZ-Bericht Nr. 4/1999, Stadtökologische Forschungen Nr. 19, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle.

- Nehls, T. (2007): Water and Heavy Metal Fluxes in Paved Urban Soils, Dissertation an der Technsichen Universität Berlin, URN: urn:nbn:de:kobv:83-opus-16224, URL: http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2007/1622/.
- Nehls, T.; Jozefaciuk, G.; Sokolowska; Z. Hajnos, M. and Wessolek G. (2007): Filter properties of seam material from paved urban soils, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 4, 2625-2657, SRef-ID: 1812-2116/hessd/2007-4-2625, 2007.
- 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.
- Pratt, C. J.; Mantle, J. D. G. und Schofield, P. A. (1995): UK Research into the Performance of Permeable Pavement, Reservoir Structures in Controlling Stormwater Discharge Quanitity and Quality, Wat. Sci. Techn., 32(1), S. 63-69.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde, 12. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Schiffler, G. R. (1992): Experimentelle Erfassung und Modellierung der Infiltration stärkerer Niederschläge unter realen Feldbedingungen, Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft 40.
- 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 f
 ür 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.
- Simunek J., Senja M. und van Genuchten M. Th. (1999): The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media, Technical Manual, U.S. Salinity Laboratory.
- SLG (2004): Marktdatenerhebung der Fachvereinigung Betonprodukte für Straßen-, Landschafts- und Gartenbau e.V.. Bonn 2004.
- Smith D.R. (1984): Evaluation of concrete grid pavements in the United States, Proc. 2nd Int. Conf. on Concrete Block Paving, Delft, S. 330-336.
- Statistisches Bundesamt (2006): Datenreport 2006 Zahlen und Fakten über die Bundesrepublik Deutschland, Bundeszentrale für politische Bildung.

- Suda, S., Yamanaka, S., Kodama, O. und Hata, M. (1988): Development and Application of Permeable Paving Concrete Block, 3rd Int. Conf. Proc. on Concrete Block Paving, Italy, S. 130-136.
- Sztruhar, D. und Wheater, H.S. (1993): Experimental and numerical study of stormwater infiltration through pervious parking lots, Proceedings of the 6th Int. Conf. of Urban Storm Drainage. Niagara Falls, S. 1098-1103.
- 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.
- Timmermann, U. (2001): Beurteilung wasserdurchlässiger Verkehrsflächen, Wasser und Abfall, Ausg. 1/2, S. 22-24.
- 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.
- Verworn, H.-R. und Kenter, G. (1993): Abflussbildungsansätze für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung, SuG - Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz 24/1993.

ANHANG



Anhang A-1: Kennwerte zur Befestigung von Siedlungsflächen

Abbildung A - 1: Versiegelungsgrade deutscher Großstädte²⁰⁷

 ²⁰⁷ nach Erhebungen von Netzband, M. (1998), Belekamp, L. und Pranzas, N. (1992), Gieseke, U. et al. (1988) sowie Heber, B. et al. (1993)



Abbildung A - 2: Prozentuale Flächenanteile verschiedener Pflasterbauweisen an den befestigten Grundstücksfreiflächen (ohne Verkehrsflächen)²⁰⁸

²⁰⁸ aus Breuste (1996)

Anhang A-2: Abflussbeiwerte im technischen Regelwerk

Tabelle A - 1:Abflussbeiwerte nach ATV-DVWK-M 153 (2000) zur Anwendung nach
DWA-A 138 und ATV-DVWK-M 153

Flächentyp	Art der Befestigung	Ψ м153							
Schrägdach	Metall, Glas, Schiefer, Faserzement	0,9 - 1,0							
	Ziegel, Dachpappe	0,8 - 1,0							
Flachdach (Neigung bis 3° oder	Metall, Glas, Faserzement	0,9 - 1,0							
ca. 5 %)	Dachpappe	0,9							
	Kies	0,7							
Gründach (Neigung bis 15°	humusiert < 10 cm Aufbau	0,5							
oder ca. 25 %)	humusiert ≥ 10 cm Aufbau	0,3							
Straßen, Wege und Plätze	Asphalt, fugenloser Beton	0,9							
(flach)	Pflaster mit dichten Fugen	0,75							
	fester Kiesbelag	0,6							
	Pflaster mit offenen Fugen	0,5							
	lockerer Kiesbelag, Schotterrasen	0,3							
	Verbundsteine mit Fugen, Sickersteine	0,25							
	Rasengittersteine	0,15							
Böschungen, Bankette und	toniger Boden	0,5							
Gräben *	lehmiger Sandboden	0,4							
	Kies- und Sandboden	0,3							
Gärten, Wiesen u. Kulturland $^{*)}$	flaches Gelände	0,0 - 0,1							
	steiles Gelände	0,1 - 0,3							
*) insofern sie einen Regenabfluss in das Entwässerungssystem liefern									

0,0

Flächentyp	Art der Befestigung	Ψ A128
Schrägdach	Metall, Glas, Schlefer, Faserzement	1,0
	Ziegel, Dachpappe	1,0
Flachdach (Neigung bis 3° oder	Metall, Glas, Faserzement	1,0
ca. 5 %)	Dachpappe	1,0
	Kies	0,9
Gründach (Neigung bis 15°	humusiert < 10 cm Aufbau	0,8
oder ca. 25 %)	humusiert \geq 10 cm Aufbau	0,6
Straßen, Wege, Plätze (flach)	Asphalt, fugenloser Beton	1,0
	Pflaster fugendicht	0,9
	Pflaster mit Fugen	0,7
	Kiesbelag fest	0,8
	Kiesbelag locker	0,6
	Schotterrasen	0,6
	Verbundsteine mit Fugen, Sickersteine	0,5
	Rasengittersteine	0,4

Tabelle A - 2:	Abflussbeiwerte ψ_{A128} nach ATV-DVWK-M 177 (2001) zur Ermittlung der
	Rechengröße A _{u,A128} nach ATV-Arbeitsblatt A 128

 Tabelle A - 3:
 Abflussbeiwerte nach DIN EN 752-4 (1997)

nicht angeschlossene Flächen

Art der angeschlossenen Fläche	Abflussbeiwert ψ	Anmerkungen							
Undurchlässige Flächen und stark geneigte Dächer *)	0,9 bis 1,0	je nach Muldenverlust							
Große Flachdächer	0,5	über 10 000 m²							
Kleine Flachdächer	1,0	unter 100 m ²							
Durchlässige Flächen	0,0 bis 0,3	je nach Geländeneigung und Oberflächenbeschaffenheit							
*) Große vertikale Flächen (Fassaden) können bis zu 30 % berücksichtigt werden.									

Tabelle A - 4:	Abflussbeiwerte	nach DIN	1986-100	(2007)
----------------	-----------------	----------	----------	--------

Nr.	Art der Flächen	Abflussbeiwert
1	Wasserundurchlässige Flächen, z.B.:	
	 Dachflächen 	1,0
	 Betonflächen 	1,0
	 Rampen 	1,0
	 befestigte Flächen mit Fugendichtung 	1,0
	 Schwarzdecken (Asphalt) 	1,0
	 Pflaster mit Fugenverguss 	1,0
	 Kiesdächer 	0,5
	 begrünte Dachflächen*): 	
	 für Intensivbegrünungen 	0,3
	 für Extensivbegrünungen ab 10 cm Aufbaudicke 	0,3
	 für Extensivbegrünungen unter 10 cm Aufbaudicke 	0,5
2	Teildurchlässige und schwach ableitende Flächen, z.B.:	
	 Betonsteinpflaster, in Sand oder Schlacke verlegt, Flächen mit Platten 	0,7
	 Flächen mit Pflaster, mit Fugenanteil > 15 %, z. B. 10 cm x 10 cm und kleiner 	0,6
	 wassergebundene Flächen 	0,5
	 Kinderspielplätze mit Teilbefestigungen 	0,3
	 Sportflächen mit Dränung 	
	 Kunststoff-Flächen, Kunststoffrasen 	0,6
	– Tennenflächen	0,4
	– Rasenflächen	0,3
3	Wasserdurchlässige Flächen ohne oder mit unbedeutender Wasserableitung, z.B.:	
	Parkanlagen und Vegetationsflächen, Schotter- und Schlackeboden,	0,0
	Kolikies auch mit berestigten Teilflächen, wie:	
	 Gartenwege mit wassergebundener Detke oder Finfahrten und Finzelstellnlätze mit Rasengittersteinen 	
*) sieł	e FLL (2000), Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen	

γ		Grup	ope 1		Gruppe 2				Gruppe 3				Gruppe 4				
[%]		I _G <	1 %		1	1 % ≤ I _G ≤ 4 %				4 % < I _G ≤ 10 %				I _G > 10 %			
							für	r ₁₅ [l/	s ha]	s·ha] von							
	100	130	180	225	100	130	180	225	100	130	180	225	100	130	180	225	
	1				1				1								
0*)	0,00	0,00	0,10	0,31	0,10	0,15	0,30	(0,46)	0,15	0,20	(0,45)	(0,60)	0,20	0,30	(0,55)	(0,75)	
10 [*])	0,09	0,09	0,19	0,38	0,18	0,23	0,37	(0,51)	0,23	0,28	0,50	(0,64)	0,28	0,37	(0,59)	(0,77)	
20	0,18	0,18	0,27	0,44	0,27	0,31	0,43	0,56	0,31	0,35	0,55	0,67	0,35	0,43	0,63	0,80	
30	0,28	0,28	0,36	0,51	0,35	0,39	0,50	0,61	0,39	0,42	0,60	0,71	0,42	0,50	0,68	0,82	
40	0,37	0,37	0,44	0,57	0,44	0,47	0,56	0,66	0,47	0,50	0,65	0,75	0,50	0,56	0,72	0,84	
50	0,46	0,46	0,53	0,64	0,52	0,55	0,63	0,72	0,55	0,58	0,71	0,79	0,58	0,63	0,76	0,87	
60	0,55	0,55	0,61	0,70	0,60	0,63	0,70	0,77	0,62	0,65	0,76	0,82	0,65	0,70	0,80	0,89	
70	0,64	0,64	0,70	0,77	0,68	0,71	0,76	0,82	0,70	0,72	0,81	0,86	0,72	0,76	0,84	0,91	
80	0,74	0,74	0,78	0,83	0,77	0,79	0,83	0,87	0,78	0,80	0,86	0,90	0,80	0,83	0,87	0,93	
90	0,83	0,83	0,87	0,90	0,86	0,87	0,89	0,92	0,86	0,88	0,91	0,93	0,88	0,89	0,93	0,96	
100	0,92	0,92	0,95	0,96	0,94	0,95	0,96	0,97	0,94	0,95	0,96	0,97	0,95	0,96	0,97	0,98	
*) Befe	stigung	gsgrad	e ≤ 10	% bed	lürfen i	.d.R. e	einer ge	esonde	rten Be	etracht	tung					-	

Tabelle A - 5:	Empfohlene Spitzenabflussbeiwerte nach DWA-Arbeitsblatt A 118
	(2006) in Abhängigkeit vom Befestigungsgrad γ

Anhang A-3: Zahlen- und Parameterwerte zur Modellierung des Oberflächenabflusses

Tabelle A - 6:	Monatsspezifische Reduzierungsfaktoren der Benetzungsverlusthöhen
	und Monatswerte der mittleren täglichen Verdunstungsraten ²⁰⁹

Monat	Reduzierungsfaktor der Benetzungsverlusthöhe [-]	Mittlere tägliche Verdunstungsrate [mm/d]
Januar	0,1	0,5
Februar	0,1	0,8
März	0,3	1,2
April	0,7	2,0
Mai	1,0	2,9
Juni	1,0	3,3
Juli	1,0	3,4
August	1,0	2,8
September	1,0	1,9
Oktober	0,7	1,1
November	0,3	0,8
Dezember	0,1	0,5

²⁰⁹ z.B. Verworn, H.-R. (1999) und Verworn, H.-R. und Kenter, G. (1993)

Anhang A-4: Messergebnisse zum Versickerungsvermögen aus der Fachliteratur

Тур	Bau- muster	Deckschicht	Fugen- anteil	Bau- jahr	Vers. Nr.	Beregnungs- intensität	Beregnungs- höhe	Infiltration	Infiltrations- anteil	Anfangs- verlust	Mulden- rückhalt	mittlere Infiltrationsrate	Endinfiltrations- rate
						r	R	I	I/R	A۷	MR	im	ie
			[%]			[l/(s·ha)]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[l/(s·ha)]	[l/(s·ha)]
		Betonverbundpflaster,	E 200	1000	1.1	96	34,5	12,1	35%	1,3	1.4	34	32
	I	sandverfugt	5,370	1992	1.2	194	35,0	5,6	16%	1,7	1,4	31	30
	2	Deconditionsteine	27.70	1000	2.1	82	29,5	29,5	100%	29,5		82	kein Abfluss
	Z	Kasengittersteine	21,170	1990	2.2	171	33,8	33,8	100%	25,2	_	171	kein Abfluss
_	9	Pacangittarctaina	27.7%	1000	3.1	90	33,0	9,9	30%	4,3	2.0	27	22
ıger	3	Kasengittersteine	21,170	1990	3.2	183	33,0	4,2	13%	3,2	2,9	23	22
gur	4	Verbundpflaster, nicht verfugt	4,6%	1993	4.1	87	31,5	31,5	100%	31,5	_	87	kein Abfluss
esti	-				4.2	201	36,3	36	99%	36		200	199
bef	5	Betonsteinpflaster mit	7,8%	1993	5.1	89	32,0	32	100%	32	_	89	kein Abfluss
her	5	Sickeröffnungen			5.2	187	56,3	56,3	100%	56,3		188	kein Abfluss
Fläc	6	Betonsteinpflaster mit	0.00	1000	6.1	96	34,5	12	35%	7,3	14	33	31
an	U	Sickeröffnungen	0,970	1995	6.2	186	33,5	7,6	23%	1,7	1,4	42	31
ne	7	Betonsteinpflaster mit	22.9%	1004	7.1	90	32,5	7,7	24%	1,5	1 5	21	16
	,	Rasenfugen	22,070	1994	7.2	193	34,8	3,3	9%	1,7	1,5	18	16
	0	Betonsteinpflaster mit	77 004	1004	8.1	90	32,5	21,7	67%	3,2	1 5	60	56
	U	Rasenfugen	22,8%	1994	8.2	189	34,0	10,7	31%	2,2	1,3	59	51
	0	kunstharzgebundene	100%	1004	9.1	90	32,5	32,5	100%	32,5		90	kein Abfluss
	7	Decke	100%	1334	9.2	207	37,3	22,7	61%	1,7	—	126	128

 Tabelle A - 7:
 Abfluss- und Versickerungskennwerte für verschieden Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow für neue

 Flächenbefestigungen²¹⁰
 Flächenbefestigungen

²¹⁰ aus Breuste, J. et al (1996)

Тур	Bau- muster	Deckschicht	Fugen- anteil	Bau- jahr	Vers. Nr.	Beregnungs- intensität	Beregnungs- höhe	Infiltration	Infiltrations- anteil	Anfangs- verlust	Mulden- rückhalt	mittlere Infiltrationsrate	Endinfiltrations- rate
						r	R	I	I/R	A۷	MR	im	iE
			[%]			[l/(s·ha)]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[l/(s·ha)]	[l/(s·ha)]
	10	Großformatnlatten	1 794	1077	10.1	94	34,0	6	18%	1,9	0.0	17	14
	10	arobronnatplatten	1,770	1977	10.2	192	34,5	3,3	10%	0,9	0,9	18	15
len	11	Botongohwognlatton	E 294	Ca 1950	11.1	97	35,6	5,5	15%	1,7	16	15	15
5un	11	весонуенжеургассен	3,2,0	ca. 1930	11.2	197	35,5	2,7	8%	1,7	1,0	15	13
stig	12	Kopfsteinpflaster, steinverfugt	19,6%	1044	12.1	97	14,0	2,9	21%	4,4	2.1	20	27
efe	12			1944	12.2	192	41,4	6,2	15%	2,5	2,1	29	28
enb	19	Kopfsteinpflaster,	10,9%	1044	13.1	90	32,5	4,8	15%	2,1	27	13	10
äch	15	steinverfugt		1944	13.2	197	35,5	2,6	7%	2,8	2,1	14	14
Е	14	Mocaiknflactor	6.2%	1000	14.1	94	34,0	4,2	12%	1,6	1 5	12	10
ter	14	mosaikpilastei	0,270	1900	14.2	189	34,0	2	6%	1,5	1,5	11	8
jeal	15	Mocaiknflactor	22 494	1900	15.1	100	36,0	6,3	18%	1,8	1 5	17	17
	15	mosaikpilaster	22,70	1900	15.2	192	34,5	3,4	10%	1,7	1,5	19	17
	16	Natursteinplatten	2 204	1900	16.1	93	33,5	4,1	12%	1,1		11	8
16	10	(Granit)	2,3%		16.2	197	35,5	1,7	5%	1,1	1,1	9	8

Tabelle A - 8:Abfluss- und Versickerungskennwerte für verschieden Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow für gealterte
Flächenbefestigungen²¹¹

²¹¹ aus Breuste, J. et al (1996)

Тур	Bau- muster	Deckschicht	Fugen- anteil	Bau- jahr	Vers. Nr.	Beregnungs- intensität	Beregnungs- höhe	Infiltration	Infiltrations- anteil	Anfangs- verlust	Mulden- rückhalt	mittlere Infiltrationsrate	Endinfiltrations- rate
						r	R	I	I/R	۸V	MR	im	ie
			[%]			[l/(s·ha)]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[l/(s·ha)]	[l/(s·ha)]
ца	17	wassergebundene Decke	100%	1975	17.1	72	24,3	7,1	29%	2,6	_	21	17
ecki	10	wassergebundene	100%	1001	18.1	96	34,5	9,2	27%	2,7	0 F	26	23
Ō	10	Decke	100%	1991	18.2	197	35,5	4,4	12%	2,8	2,5	24	23
den	10	wassergebundene	1000/	1000	19.1	97	35,0	3	9%	2,5		8	з
uno	19	Decke	100%	1993	19.2	197	35,5	1,5	4%	1,1	1,1	8	2
Igel		wassergebundene	1000/	1000	20.1	100	36,0	1,6	4%	2,1	0.5	4	з
ISSE	20	Decke	100%	1993	20.2	204	36,8	1,1	3%	0,5	0,5	6	2
wa	0.1	wassergebundene	1000/	1000	21.1	93	33,5	14,1	42%	3,2	1.0	39	35
	21	aus Feinkies	100%	1993	21.2	194	35,0	7,2	21%	1,6	1,3	40	36

 Tabelle A - 9:
 Abfluss- und Versickerungskennwerte für verschieden Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow für wassergebundene Decken²¹²

²¹² aus Breuste, J. et al (1996)



Abbildung A - 3: Gemessene Infiltrationsverläufe für verschiedene Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow²¹³

²¹³ aus Breuste (1996)



Abbildung A - 4: Infiltrationsraten von Pflasterflächen in Abhängigkeit vom Fugenanteil nach Borgwardt²¹⁴



Fugen, Kammern oder Sickeröffnungen nach Borgwardt²¹⁵

²¹⁵ ebenda

²¹⁴ Borgwardt, S. (1995)



Zeit [min] Abbildung A - 6: Infiltrationsraten von Pflasterflächen in Abhängigkeit von der Nutzung²¹⁶

²¹⁶ Borgwardt, S. (1995)

Anhang A-5: Verwendete Messtechnik

- 1 Zwei Tauchpumpen im Wasservorratsbehälter
- (2) Gedükerte Durchflussmesser (Flügelradmesser, Messgenauigkeit ± 3 %)
- (3) Plexiglas-Wanne mit 625 Injektionsnadeln an der Unterseite
- (4) Stahlring, \varnothing = 54 cm, Fläche ca. 0,25 m², Höhe ca. 5 cm
- 5 Näherungssensor zur Bestimmung des Wasserstandes



Abbildung A - 7: Tropfinfiltrometer²¹⁷

²¹⁷ aus Nolting et al. (2005)



Abbildung A - 8: Doppelring-Infiltrometer



Abbildung A - 8:

Lysimeteranlage für wasserdurchlässige Flächenbeläge im IKT

mit: (1) Vorlagebehälter, (2) Schlauchpumpe, (3) Zulauf zur Beregnungseinheit, (4) MID, (5) Acrylwanne mit Kanülen 6) Wechselrahmen



Abbildung A - 9: Bauteile der Lysimeteranlage

- (1) Anlage mit eingebautem Flächenbelag
- (2) hoher Wechselrahmen mit eingebautem Pflasterbelag (inkl. Bettungs- und Tragschicht)
- (3) flacher Wechselrahmen mit eingebautem Pflasterbelag (nur Bettungsschicht)
- (4) TDR-Sonden zur Wassergehaltsmessung
- (5) eingebauter Pflasterbelag (Rechteckpflaster mit 10 mm Fugenweite); vorne links Kabel der TDR-Sonden
- (6) Unterteil der Versuchsanlage mit Sammeltrichter für Sickerwasser und Technik
- (7) hoher Wechselrahmen leer
- (8) Schottertragschicht und TDR-Sonde beim Einbau

Anhang A-6: Versuchsflächen auf dem Campusgelände der TU Kaiserslautern



Abbildung A - 10: Lage der Untersuchungsflächen rund um Gebäude 14 der TU Kaiserslautern



Abbildung A - 11: Lage der Untersuchungsfläche vor Halle 67 der TU Kaiserslautern



Abbildung A - 12: Untersuchungsstandorte der Vergleichsmessungen mittels Doppelring-Infiltrometer auf dem Campusgelände der TU Kaiserslautern²¹⁸

Parkplatze Halle 67 aus fugenarmem Verbundpflaster (oben links); Parkplatz vor Gebäude 14 aus fugenarmem Doppelverbundpflaster (oben rechts); Füßgängerüberweg auf Parkplatz vor Gebäude 14 aus fugenarmem Porenbetonpflaster (Mitte links); Parkplatz neben Gebäude 14 aus fugenarmem Verbundpflaster (Mitte rechts); Fußweg/Notzufahrt zwischen Gebäuden 13/14 aus fugenarmem Betonpflaster (unten links); Gehweg/Notzufahrt zwischen Gebäuden 13/14 aus Rasengittersteinen (unten rechts)



Abbildung A - 13: Untersuchungsstandorte der Vergleichsmessungen mittels Doppelring-Infiltrometer auf dem Campusgelände der TU Kaiserslautern²¹⁹



Abbildung A - 14: Stellplatzbereiche geringerer und höherer Beanspruchung durch parkenden Kraftfahrzeuge

²¹⁹ Gehweg neben Gebäude 14 aus fugenarmen Betonplatten (links); Gehweg zwischen Gebäuden 13/14 aus Mosaikpflaster (rechts)



Anhang A-7: Versuchsfeld Lingen (Ems)

Abbildung A - 15: Versuchsfeld in Lingen (Ems) auf dem Parkplatz des Freizeitbades und des Sportstadions

Fläche Nr.	Belag Nr.	Belagstyp	Hersteller Belag	Gefälle	Fugenmaterial	Bettungsmaterial	Tragschichtmaterial	Abdichtung Planum
1					Sand 0/5 mm			ohne Abd. mit Abd
ı m			_	2,5%		Splitt 2/5 mm	Brechkorngemisch 0/45 mm	ohne Abd.
4	ч Ч	Drain STON (Euronmeite 1 mm)	Vloetarmanu		24nu 0/0 11111 + 11/4 11111			mit Abd.
5	0				Sand 0/5 mm			ohne Abd.
9			_	1 00%		Solit 2/5 88	Brochlorncomisch 0/15 mm	mit Abd.
2			_	0/_0/T	Sand 0/5 mm + 1/4 mm			ohne Abd.
8								mit Abd.
6	B1	Bitumendecke (Asphaltfeinbeton)	-/-	2,5%	-/-	-/-	Brechkorngemisch 0/45 mm	ohne Abd.
10	B3	Rechteckpflaster (Fugenweite 4 mm)	behaton	2,5%	Grubensand $d < 1 mm$	0/1	Brechkorngemisch 0/45 mm	ohne Abd.
11	. B2	Sanddecke (auf Schottertragschicht)	-/-	1,0%	-/-	Sand-Splitt-Gemisch	Gemisch 11/45 mm	ohne Abd.
12		,			-/-			mit Abd.
13			_				Brechkorngemisch 0/45 mm	ohne Abd.
14	R7	RFKO-Drain (Porenhetonnflaster)	Rekers	1 0%	Sand 0/5 mm	Solitt 2/5 mm		mit Abd.
15	ò			2, 0, 1			Decycling-Material 0/32 mm	ohne Abd.
16								mit Abd.
17								ohne Abd.
18	č			ò			Brechkorngemisch 0/45 mm	mit Abd.
19	64	Kechteckpriaster (Fugenweite 10 mm)	behaton	1,0%	Splitt 2/5 mm	Splitt 2/5 mm		ohne Abd.
20			_				Recycling-Material 0/32 mm	mit Abd.
21								ohne Abd.
22	1				Sand-Splitt-Boden-Gemisch		Brechkorngemisch 0/45 mm	mit Abd.
23	- B5	Rechteckpflaster (Fugenweite 30 mm)	behaton	1,0%		Splitt 2/5 mm		ohne Ahd
24	-		_		Splitt 5/11 mm		Recycling-Material 0/32 mm	mit Abd.
25								ohne Abd.
26	ſ		-	č.			Brechkorngemisch 0/45 mm	mit Abd.
27	9	KEKU-Urain (Porenbetonpflaster)	Kekers	2,2%	Sand U/S mm	Splitt 2/5 mm		ohne Abd.
28			_				Recycling-Material 0/32 mm	mit Abd.
29								ohne Abd.
30	L C			i L	Sand-Splitt-Boden-Gemisch		Brechkorngemisch 0/45 mm	mit Abd.
31	ся С	Rechteckpflaster (Fugenweite 30 mm)	benaton	%c′7		mm c/z thirds		ohne Abd.
32			_		Splitt 5/11 mm		Recycling-Material 0/32 mm	mit Abd.
33								ohne Abd.
34			_				brechkorngemisch U/45 mm	mit Abd.
35	č			ŝ		mm c/z thirds		ohne Abd.
36	64	Rechteckpflaster (Fugenweite 10 mm)	penaton	%c'7	mm c/z mide		Kecycling-Material U/32 mm	mit Abd.
37			_					ohne Abd.
38			_			Grubensand d < 1 mm	Brechkorngemisch U/45 mm	mit Abd.
39	B3	Rechteckpflaster (Fugenweite 4 mm)	behaton	2,5%	Grubensand $d < 1 mm$	Grubensand d < 1 mm	Brechkorngemisch 0/45 mm	ohne Abd.
40	B4	Rechteckpflaster (Fugenweite 10 mm)	behaton	1,0%	Splitt 2/5 mm	Splitt 2/5 mm	Gemisch 11/45 mm	ohne Abd.
41	B5	Rechteckpflaster (Fugenweite 30 mm)	behaton	1,0%	Splitt 2/5 mm + 5/11 mm	Splitt 2/5 mm	Gemisch 11/45 mm	ohne Abd.

Abbildung A - 16: Matrix der baulichen Charakteristika der Testflächen auf dem Untersuchungsfeld in Lingen (Ems)



Anhang A-8: Messerwertdarstellung Infiltrometerversuch

Abbildung A - 17: Gegenüberstellung der Ganglinienverläufe von Ist-Werten und fortlaufenden Mittelwerten der Versickerungsrate am Beispiel der Messwerte des Untersuchungsstandorts Gelsenkirchen

Anhang A-9: Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen



Abbildung A - 18: Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen von Belägen aus Sickerfugenpflaster differenziert nach Nutzung und Liegezeit



Abbildung A - 19: Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen von Belägen aus Porenbetonpflaster differenziert nach Nutzung und Liegezeit



Abbildung A - 20: Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen von Rasengitterbelägen differenziert nach Nutzung und Liegezeit



Abbildung A - 21: Statistische Kennwerte zum Versickerungsvermögen von Belägen aus konventionellem Pflaster mit erhöhten Fugenanteil (> 6%) differenziert nach verkehrlicher Beanspruchung und Liegezeit



Anhang A-10: Messwerte des Versuchsfeldes in Lingen (Ems)

Abbildung A - 22: Ganglinien der Beregnungsintensität, des Oberflächenabflusses sowie der rechnerischen Versickerungsrate für exemplarische Testfelder bei Versuchen mit künstlicher Beregnung (Lingen)



Abbildung A - 23: Korrelation zwischen Versickerungsvermögen und Niederschlagshöhe (Versuchsfeld Lingen)



Abbildung A - 24: Versickerungsraten in Abhängigkeit von der Trockenperiode vor Regenbeginn (Versuchsfeld, Lingen)



Abbildung A - 25: Mittlere Versickerungsrate je Testfeld und Beregnungsintensität (Flächenpaare mit 2,5% und 1,0% Gefälle; Versuchsfeld Lingen)



Abbildung A - 26: Mittlere prozentuale Abweichungen der Versickerungsrate für Flächenpaare mit 2,5% und 1,0% Gefälle (Versuchsfeld Lingen)


Abbildung A - 27: Differenzen in den Versickerungsraten an den Belagstypen B4 und B7 bei unterschiedlichem Tragschichtmaterial (Versuchsfeld, Lingen)



Abbildung A - 28: Mittlere prozentuale Abweichungen der Versickerungsrate für Flächenpaare mit und ohne Abdichtung des Planums (Versuchsfeld Lingen)



Abbildung A - 29: Abflussganglinien an Flächenpaaren mit und ohne abgedichtetem Planum für intensitätsstarke und volumenreichen Ereignisse

Anhang A-11: Matrizes der durchgeführten Versuchsserien

Flächencha	arakteristik	Niederschlagsbelastung (Beregnungscharakteristik)											
Coföllo	Quarmahl		konstante Beregnungsintensität [l/(s·ha)]										Infiltr
Geralle	Quarzmeni	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	test
	_				Зх					Зх			
2 5%	500 g/m²												
2,370	1000 g/m²												
	2000 g/m²												

Abbildung A - 30: Versuchsmatrix der Versuchsserie 1 an Sickerfugenpflaster mit splittverfüllten Fugen (Fugenweite 10 mm)220

Flächen	Flächencharakteristik				Niederschlagsbelastung (Beregnungscharakteristik)										
Coföllo	Kolmationograd	Quaramahl		k	onstan	te Bere	egnung	sinten	sität [l∕(s⋅ha)]		Infiltr		
Geralle	Kolmationsgrau	Quarzmeni	25	50	75	100	150	200	300	500	750	1000	test		
	Neuzustand	_				4 x		4 x		2 x					
2,5%	starke Kolmation	500 g/m²				5 x		2 x	2 x	4 x			2 x		
	extreme Kolmation	750 g/m ²				5 x		2 x	2 x	3 x			2 x		

Abbildung A - 31: Versuchsmatrix der Versuchsserie 2 an fugenarmem Rechteckpflaster

²²⁰ dunkel markierte Felder repräsentieren jeweils einen oder mehrere Tests für die jeweilige Beregnungsintensität

Flächen	charakteristik		Niederschlagsbelastung (Beregnungscharakteristik)											
Gefälle	Kolmationsgrad	Quarzmehl		ko	onstan	te Bere	gnung	sinten	sität [l/(s⋅ha)]		Infiltr	Modellregen Fuler Typ II
Containe			25	50	75	100	150	200	300	500	750	1000	test	$(n = 0, 2 a^{-1})$
	Neuzustand	_					3 х							
2 5%	mäßige Kolmation	200 g/m²				4 x	4 x	2 x						
2,3 /0	ausgeprägte Kolmaltion	400 g/m ²				4 x	4 x							
	starke Kolmation	500 g/m²				2 x	4 x							
	Neuzustand	_												
5,0%	mäßige Kolmation	500 g/m²				2 x								
	ausgeprägte Kolmaltion	750 g/m²				2 x								
	Neuzustand	_												
7,5%	mäßige Kolmation	500 g/m²				2 x								
	ausgeprägte Kolmaltion	750 g/m²				2 x								

Abbildung A - 32: Versuchsmatrix der Versuchsserie 3 an fugenarmem Doppelverbundpflaster

Flächene	charakteristik	Niederschlagsbelastung (Beregnungscharakteristik)											
Cofällo	Quarzmahl		k	onstan	te Bere	egnung	sinten	sität [l∕(s⋅ha)]		Infiltr	
Geralle	Quarzmeni	25	50	75	100	150	200	300	500	750	1000	test	
	_							2 x					
	500 g/m²												
	1000 g/m²												
2 5%	1500 g/m²												
2,3%	2000 g/m²							2 x					
	3000 g/m²												
	4000 g/m²												
	8600 g/m²												

Abbildung A - 33: Versuchsmatrix der Versuchsserie 4 an Sickerfugenpflaster mit splittverfüllten Fugen (Fugenweite 10 mm)

Flächenchara	kteristik		I	Nieders	chlagst	elastur	ıg (Bere	egnunge	charak	teristik)
Versuchs-	Delementum	Quarzmehl /		koi	nstante	Beregn	ungsint	tensität	[l/(s⋅h	a)]	
reihe	belagstyp	Untergrund	25	50	75	100	200	300	500	750	1000
	Donnelverhund-Pflaster	-									
VR 5.1	fugenarm 2,5% Gefälle	200 g/m²									
	onne tragschicht	400 g/m²									
VR 5.2	Schottertragschicht	homogene Tragschicht									
VR 5.4	ohne Deckbelag	Tragschicht auf hydr. Sperrschicht									
	Pechteck-Betonnflaster	-									
VR 5.5	mit 10 mm Sickerfuge 2,5% Gefälle	1000 g/m²									
	2,5% Gefälle ohne Tragschicht	2000 g/m²									
	Rechteck-Betonpflaster	-									
VR 5.6	mit 7 mm Sickerfuge 2,5% Gefälle	500 g/m²									
	onne tragschicht	1000 g/m²									
		-									
VP 5 7	poröses Betonpflaster fugenarm	500 g/m²									
VIC 5.7	2,5% Gefälle ohne Tragschicht	1000 g/m²									
		2000 g/m²									
VR 5.8	Doppelverbundpflaster 2,5% Gefälle	-									
	ohne Tragschicht auf Splittschüttung	400 g/m²									
VR 5.9	Rechteck-Betonpflaster fugenarm	-									
1K 515	2,5% Gefälle ohne Tragschicht auf Splitt	400 g/m²									

Abbildung A - 34: Versuchsmatrix der Versuchsserie 5 an verschiedenen Deckbelägen und an Schotterschichten in singulärer Aufstellung

Flächen	charakteristik			Nieder	rschlag	sbelas	tung (I	Beregn	ungsch	narakte	ristik)		
Coffillo			konstante Beregnungsintensität [l/(s·ha)]										
Geralle	Kolmationsgrad	Quarzmeni	50	100	150	200	300	400	500	600	800	1000	
7,5%	Neuzustand	_											

Abbildung A - 35: Versuchsmatrix der Versuchsserie 6 an fugenarmem Porenbetonpflaster mit hohem Gefälle

Flächencha	akteristik		Niederso	hlagsbelast	ung (Beregi	nungscharal	kteristik)
Versuchs-	Polactur	Quaramobi	kon	stante Bere	gnungsinter	nsität [l/(s∙	ha)]
reihe	Delaystyp	Qual2mem	100	200	300	400	500
VS 7 2	Plattebelag Fugenanteil 0.6%	_					
V 37.2	Betonplatten 50x50x5 cm	500 g/m²					
VS 7 1	Plattebelag Fugenanteil 1,2%	-					
137.1	Betonplatten 40x40x5 cm	500 g/m²					
VS 7 3	Plattebelag	-					
V 37.3	Betonplatten 30x30x5 cm	500 g/m²					
VS 7.4	Plattebelag (Fugenanteil 1,8%) Tragschicht auf Sperrschicht	500 g/m²					

Abbildung A - 36: Versuchsmatrix der Versuchsserie 7 an fugenarmen Plattenbelägen mit unterschiedlichen Fugenanteilen

Anhang A-12: Sieblinien der verwendeten Materialgemische



Abbildung A - 37: Sieblinie des als Tragschichtmaterial verwendeten Korngemisches



Abbildung A - 38: Sieblinie des zur Herstellung eines gering durchlässigen Planums verwendeten Korngemisches aus 50% Quarzsand und 50% Quarzmehl

Anhang A-13: Zusammenhang zwischen Infiltrationsrate und Wassergehalt in der Tragschicht



Abbildung A - 39: Korrelationen zwischen Infiltrationsrate und Wassergehalt in der Tragschicht für einen Doppelverbundpflasterbelag

Anmerkung

In den beiden Grafiken sind die aus den Intervallberegnungen gewonnen Messwerte der Infiltrationsrate über die zum jeweiligen Zeitpunkt an der TDR-Sonde 6, unmittelbar unterhalb der Bettungsschicht, registrierten Wassergehalte für den mäßig sowie den deutlich kolmatierten Pflasterbelag aus Doppelverbundsteinen aufgetragen. Eine signifikante Korrelation zwischen den beiden Größen ist dabei nicht zu erkennen. Eine Berücksichtigung der jeweiligen Vorrückgeschwindigkeit der Infiltrationsfront bspw. indem die Wassergehaltswerte den jeweils 5-15 Minuten früher registrierten Infiltrationsraten zugeordnet werden, zeigt kein anderes Bild.

Anhang A-14: Gegenüberstellung der Infiltrationsraten von Doppelverbundund Rechteckpflaster



Abbildung A - 40: Gegenüberstellung der Infiltrationsraten von Doppelverbund- und Rechteckpflaster für verschiedene Beregnungsintensitäten, Kolmationsgraden und Dauerstufen (Gefälle 2,5%)

Anmerkung

Sowohl im Neuzustand als auch im Gebrauchszustand wurde bei den betrachteten Beregnungsintensitäten von 25-1000 l/(s·ha) keine nennenswerten Differenzen zwischen den Infiltrationsraten beobachtet. Auffällig sind lediglich die Infiltrationsraten, die für beide Pflasterbeläge im Gebrauchszustand bei einer Beregnungsintensität von 200 l/(s·ha) sowie von 1000 l/(s·ha) registriert wurden. Sie liegen im Vergleich zu den übrigen Beregnungsintensitäten relativ hoch.

Die hohen Infiltrationsraten für die extreme Beregnungsintensität von 1000 l/(s·ha) rühren nicht allein aus der mit der Beregnungsintensität ansteigenden Infiltrationskapazität her. Hier war phasenweise die Ablaufrinne des Oberflächenabflusses überlastet, so dass nicht der gesamte Oberflächenabfluss erfasst werden konnte. Dies führt dazu, dass die aus Beregnungs- und Abflussintensitäten ermittelten Infiltrationsraten zeitweilig zu hohe Werte aufweisen. Dies dokumentiert sich in der Gangliniendarstellung in Abbildung A - 41 an dem wellenförmigen Verlauf der Infiltrationsrate.



Abbildung A - 41: Infiltrationsganglinien von fugenarmen Doppelverbund- und Rechteckpflasterbelägen für Beregnungsversuche mit 75 l/(s·ha), 200 l/(s·ha) und 1000 l/(s·ha) bei einem Gefälle 2,5%²²¹

Die ebenfalls vergleichsweise hohen Infiltrationswerte bei den Beregnungsversuchen mit 200 l/(s·ha) haben dagegen eine andere Ursache. Sie sind vermutlich in der Hauptsache darauf zurückzuführen, dass vor diesen beiden Beregnungen jeweils eine längere Trockenphase von ≥ 24 Stunden lag, während den übrigen Beregnungen jeweils nur kurze Beregnungspausen vorangingen. Dies äußert sich u.a. in einem degressiven Verlauf der Infiltrationsrate über die Beregnungsdauer, wie er in Abbildung A - 41 gezeigt ist. Bei allen übrigen Beregnungsintensitäten stellten sich nach wenigen Minuten nahezu konstante Versickerungsraten ein; hier exemplarisch gezeigt für Intensitäten von 75 l/(s·ha) und von 1000 l/(s·ha). Bei den Beregnungsintervallen nach deutlich längerer Trockenperiode nahmen dagegen die Infiltrationsraten über die gesamte Beregnungsdauer von zwei Stunden kontinuierlich ab.

Da die Pflasterbeläge samt Bettung bei den Versuchsserien 5.8 und 5.9 über einer 40 cm mächtigen, hochdurchlässigen Splittschicht angeordnet waren, kann ausgeschlossen

²²¹ VR 5.8: Doppelverbundpflaster; VR 5.9: Rechteckpflaster

werden, dass die Degression der Versickerungsrate von der Unterlage der Pflasterschicht hervorgerufen wird. Dies wird auch gestützt von den in der Splittschüttung gemessenen Wassergehalten, die trotz der teilweise extrem hohen Beregnungsintensitäten bei keinem Versuch über einen Wert von 7% angestiegen sind. Daher müssen die hydraulischen Zustände im Fugenmaterial für die kontinuierlich sinkende Infiltrationsrate verantwortlich sein, können jedoch mit der zur Verfügung stehenden Messtechnik nicht erfasst werden.

Grundsätzlich könnte die Abnahme der Infiltrationsleistung während der Beregnung auch dadurch hervorgerufen worden sein, dass mit der hier jeweils erfolgten ersten Beregnung nach Einspülen des Quarzmehls noch eine weitere Verfrachtung von auf den Pflastersteinen haftenden Quarzmehlrückständen in die Fugen stattgefunden hat. Diese Nachkolmatierung würde zwar ebenso eine Abnahme der Versickerungsrate nach sich ziehen, allerdings würde sie eher zu einem abrupteren Absinken der Versickerungsrate führen, nicht aber zu einer sukzessiven Degression. Dies haben die Messdaten, die extra zu diesem Zweck auch während sämtlicher Einspülvorgänge an den untersuchten Pflasterbelägen aufgezeichnet wurden, eindeutig gezeigt. Aus diesem Grund erscheint eine ungewünschte Nachkolmatierung während der Beregnungsversuche – zumindest als Hauptursache – doch eher unwahrscheinlich.

Der Infiltrationsverlauf deutet vielmehr darauf hin, dass mit der einsetzenden Beregnung eine Aufsättigung des Fugensandes erfolgt ist. Dabei werden zunächst die Grobporen, danach die Mittelporen und ggf. auch die Feinporen des Sandes mit Wasser gefüllt und der Wassergehalt im Fugensand steigt aufgrund der vergleichsweise langen Trockenperiode nennenswert an. Dabei sinkt das Matrixpotenzial des Fugensandes betragsmäßig sukzessive ab und die Wasserleitfähigkeit erhöht sich. Gleichzeitig ändert sich jedoch auch der hydraulische Gradient zwischen der Oberkante der Pflasterfläche sowie der Pflasterbettung und wirkt der steigenden Wasserleitfähigkeit entgegen. Dabei nimmt der hydraulische Gradient vermutlich in stärkerem Maße ab als die Leitfähigkeit steigt, so dass sich insgesamt ein degressiver Verlauf der Infiltrationsrate über die Versuchsdauer ergibt, wie er sich auch bei Versuchen an Pflasterbelägen auf einer regulären Schotterschicht gezeigt hat (siehe z.B. Abbildung 59 und Abbildung 60). In anderen Beregnungsversuchen wurden dagegen ansteigende oder konstante Versickerungsraten beobachten. Hier war die Abnahme des hydraulischen Gradienten aufgrund anderer Wassergehaltsverteilungen (v.a. in der Bettung und den oberen Tragschichthorizonten) weniger ausgeprägt oder frühzeitig abgeschlossen, so dass die Zunahme der Wasserleitfähigkeit mit steigendem Sättigungsgrad dominierte.

Dennoch stehen die hier diskutierten Ergebnisse der beiden Beregnungsversuche mit Intensitäten von jeweils 200 l/(s·ha) durchaus in einem gewissen Widerspruch zu den Ergebnissen der zuvor geschilderten Versuche mit intermittierender Beregnung. Bei den Intervallberegnungen konnte kein derart ausgeprägter Einfluss der Trockenperiode auf das Versickerungsvermögen festgestellt werden. Weshalb sich hier dennoch der beschriebene Einfluss zeigt, bleibt unklar. Über die bodenhydraulischen Prozesse, die sich im Detail bei der Beregnung im Fugenraum abspielen, kann nur gemutmaßt werden.

Obgleich das oben beschriebene Wechselspiel zwischen Wassergehalt, Potenzialgefälle und Infiltrationsrate messtechnisch nicht erfasst werden konnte, führen die durchgeführten Beregnungsversuche an Pflasteraufbauten mit und ohne reguläre Tragschicht dennoch zu der Erkenntnis, dass in aller erster Linie die bodenhydraulischen Zustände in den Fugen das Infiltrationsvermögen einer Pflasterfläche bestimmen. Die Tragschicht übt dagegen nur in Sonderfällen einen Einfluss auf die Versickerungsleistung aus. Dennoch wären weiter gehende Kenntnisse zu den detaillierten hydraulischen Zuständen und den damit verbundenen physikalischen Prozessen in den Fugen wünschenswert.





Abbildung A - 42: Aufbau der untersuchten Plattenbeläge (Schemaskizze)



Fugenanteil (D = 30 min)







Abbildung A - 45: Rückgang der Infiltrationsraten während des Einspülvorganges bei den untersuchten Plattenbelägen (Versuchsserie 7)



Abbildung A - 46: Messergebnisse des Versuchs V7.4a mit unvollständiger Kolmatierung des Plattenbelages auf gering durchlässigem Planum



Abbildung A - 47: Abflussbeiwerte eines Plattenbelages mit einem Fugenanteil von 1,8% bei einem Gefälle von 2,5% in Abhängigkeit von Beregnungsintensität und Kolmationsgrad



Abbildung A - 48: Abflussbeiwerte eines Plattenbelages mit einem Fugenanteil von 0,6% bei einem Gefälle von 2,5% in Abhängigkeit von Beregnungsintensität und Kolmationsgrad

Anmerkung

Die angegebenen Abflussbeiwerte repräsentieren die aus den Messdaten registrierten Oberflächenabflüsse für die drei betrachteten Beregnungsintensitäten von 100 I/(s·ha), 200 I/(s·ha) und 300 I/(s·ha) jeweils für die Beläge im Neuzustand sowie mit ausgeprägten Kolmationserscheinungen. Für den Belag mit einem Fugenanteil von 1,8% wurden darüber hinaus die Messwerte herangezogen, die sich aus der unvollständigen Einspülung des Quarzmehls ergaben. Dieser Zustand wurde hierbei als mäßiger Kolmationsgrad eingestuft. Für diesen Zustand mussten jedoch einige der angegeben Werte abgeschätzt werden. Die Abflussbeiwerte repräsentieren hier also nicht durchgängig echte Messwerte. Als Orientierungswerte zwischen den beiden Grenzbereichen, die der Neuzustand und der starke Kolmationsgrad gewissermaßen darstellen, sind sie jedoch durchaus hilfreich.

Anhang A-16: Messergebnisse an Sickerfugenpflaster



Abbildung A - 49: Messergebnisse eines Pflasterbelages mit splittverfüllter Sickerfuge von 7 mm Breite in singulärer Anordnung ohne Tragschicht (1000 g/m² Quarzmehl, 2,5% Gefälle)

Anmerkung

Das Diagramm zeigt die Infiltrationsraten bei sequenzieller Beregnung mit Intensitäten von 200-750 l/(s·ha) bei einer Fugenbreite von 7 mm bei singulärer Anordnung des Belages. Die in die Fugen gespülte Quarzmehlmenge betrug hier 1000 g. Die Differenzen zwischen Beregnungsintensität und Infiltrationsrate rühren aus Spritzwasserverlusten her. Nennenswerte Oberflächenabflüsse wurden auch hier nicht registriert.

Anhang A-17: Numerischen Simulation (HYD-RUS-2D)

Tabelle A - 10:Modellparameter nach van Genuchten zur numerischen Simulation eines
Plattenbelages im Gebrauchszustand

Material	Θ _R [cm³/cm³]	⊖ s [cm³/cm³]	α [-]	n [-]	K _s [cm/min]
Fugenmaterial (Sand 0/1 mm)	0,05	0,48	0,05	2,0	16,0
Bettungsmaterial (Splitt 2/5 mm)	0,05	0,42	0,55	5,5	6,0
Tragschichtmaterial (Schotter 0/45 mm)	0,05	0,37	0,55	6,5	20,0
Kleinformatplatte	0,05	0,08	0,01	2,0	0,002

Tabelle A - 11: Modellparameter nach van Genuchten zur numerischen Simulation eines Sickerfugenpflasters im Gebrauchszustand

Material	Θ _R [cm³/cm³]	⊖ s [cm³/cm³]	α [-]	n [-]	K s [cm/min]
Fugenmaterial (Splitt 2/5 mm)	0,05	0,42	0,55	7,5	60,0
Bettungsmaterial (Splitt 2/5 mm)	0,05	0,45	0,55	5,5	6,0
Tragschichtmaterial (Schotter 0/45 mm)	0,05	0,37	0,55	6,5	20,0
Pflasterstein	0,05	0,06	0,01	5,5	0,0005



Abbildung A - 50: Hydraulische Leitfähigkeiten und Saugspannungen verschiedener Materialien einer Pflasterkonstruktion in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Material	Θ _R	Θs	α	n	Ks
	[-]	[-]	[-]	[-]	[cm/min]
Bettung B01	0,050	0,450	0,550	5,50	6,000
Bettung B02	0,050	0,450	0,550	5,50	1,200
Bettung B03	0,045	0,430	0,145	2,68	0,495
Bettung B04	0,045	0,430	0,145	2,68	0,120
Bettung B05	0,057	0,410	0,124	2,28	0,240

 Tabelle A - 12:
 Modellparameter der betrachteten Bettungsmaterialien

Tabelle A - 13: Modellparameter der betrachteten Tragschichtmaterialien

Material	Θ _R [-]	Θs [-]	α [-]	n [-]	K s [cm/min]
Tragschicht T01	0,05	0,37	0,55	6,5	20,000
Tragschicht T02	0,05	0,37	0,55	6,5	10,000
Tragschicht T03	0,05	0,37	0,55	6,5	5,000
Tragschicht T04	0,05	0,37	0,55	6,5	1,000
Tragschicht T05	0,05	0,37	0,55	6,5	0,200
Tragschicht T06	0,05	0,43	0,15	2,5	1,000
Tragschicht T07	0,05	0,43	0,15	2,5	0,500
Tragschicht T08	0,05	0,43	0,15	2,5	0,100
Tragschicht T09	0,05	0,43	0,15	2,5	0,010
Tragschicht T10	0,05	0,43	0,15	2,5	0,001

Material	Θ _R [-]	Θ _s [-]	α [-]	n [-]	K_s [cm/min]
Planum P01	0,078	0,430	0,036	1,56	0,0173
Planum P02	0,067	0,450	0,020	1,41	0,0075
Planum P03	0,100	0,390	0,059	1,48	0,02183
Planum P04	0,100	0,390	0,059	1,48	0,01
Planum P05	0,100	0,390	0,059	1,48	0,005
Planum P06	0,100	0,390	0,059	1,48	0,001
Planum P07	0,100	0,390	0,059	1,48	0,0001
Planum P08	0,100	0,390	0,059	1,48	0,00001
Planum P09	0,100	0,390	0,059	1,48	0,0000012
Planum P10	0,100	0,390	0,059	1,48	0,00000012

 Tabelle A - 14:
 Modellparameter der betrachteten Plana (Unterlagen des Pflasters)



Abbildung A - 51: Gegenüberstellung gemessener und simulierter Volumenströme für fugenarmes Doppelverbundpflaster bei mäßiger Kolmation bei einer Beregnungsintensität von 100 l/(s·ha)



Abbildung A - 52: Gegenüberstellung gemessener und simulierter Volumenströme für fugenarmes Doppelverbundpflaster bei mäßiger Kolmation bei einer Beregnungsintensität von 100 l/(s·ha)



Abbildung A - 53: Gegenüberstellung gemessener und simulierter Volumenströme für fugenarmes Doppelverbundpflaster bei mäßiger Kolmation bei einer Beregnungsintensität von 200 l/(s·ha)



Abbildung A - 54: Gegenüberstellung gemessener und simulierter Volumenströme für fugenarmes Doppelverbundpflaster bei mäßiger Kolmation bei einer Beregnungsintensität von 200 l/(s·ha)



Abbildung A - 55: Infiltrationsrate eines natürlichen Bodens bei Beregnung mit konstanter Intensität (Simulation Hydrus-2D für einen lehmigen Sand auf einer Schicht aus sandigem Lehm)



Abbildung A - 56: Wassergehalts- und Saugspannungsverläufe in verschiedenen Höhenhorizonten des Pflasteraufbaus eines fugenarmen Verbundpflaster bei einem vereinfachten Modellregen (Euler-Typ II)





Anhang A-18: Ablesebeispiele Abflussbeiwerte



Abbildung A - 58: Nomogramme zur Bestimmung von Abflussbeiwerten

Ablesebeispiel 1

Für einen fugenarmen Plattenbelag mit ausgeprägter Kolmation und einem Gefälle von 3% ergibt sich für einen 30-minütigen Blockregen mit einer Regenspende r = 100 l/(s·ha) ein Abflussbeiwert ψ = 0,62. Bei einer Regenspende r = 225 l/(s·ha) ergibt sich für den gleichen Belag ein Abflussbeiwert ψ = 0,82. Bei einer Regenspende r = 50 l/(s·ha) ein Abflussbeiwert ψ = 0,28.

Ablesebeispiel 2

Für Pflasterbelag aus konventionellem Verbundpflaster mit ausgeprägter Kolmation ergibt sich für einen 30-minütigen Blockregen mit einer Regenspende r = 100 l/(s·ha) ein Abflussbeiwert ψ = 0,48.

Ablesebeispiel 3

Für den gleichen Belag wird bei einem 60-minütigen Blockregen der gleichen Regenspende von r = 100 l/(s·ha) der Wert aus dem Nomogramm zur Berücksichtigung der längeren Regendauer erhöht; z.B. um 10%-15%. Dies liegt im Ermessen des Anwenders. Bei einer Erhöhung um 15% ergibt sich ein Abflussbeiwert ψ = 0,55.

Anhang A-19: Urbanhydrologische Vergleichssimulationen

 Tabelle A - 15:
 Gewählte Versickerungsparameter für Rasenpflaster bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung im Modell

RASENGITTERBELAG											
Unterschreitungshäufigk	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	
sehr hoher Differenzierungsgrad	f ₀ [l/(s·ha)]	40	120	140	170	215	250	280	460	760	1500
	f_{E [l/(s} ⋅ha)]	30	110	130	160	205	240	270	450	750	1500
hoher Differenzierungsgrad	f ₀ [l/(s·ha)]	80,0		155,0		232,5		370,0		1130,0	
	f_{E [l/(s·ha)]}	70,0		145,0		222,5		360,0		1125,0	
mittlerer Differenzierungsgrad	f ₀ [l/(s·ha)]		100,00		228,75					906,67	
	f _E [l/(s⋅ha)]	90,00			218,75				900,00		
geringer	f ₀ [l/(s·ha)]	137,00				650,00					
Differenzierungsgrad	f _E [l/(s⋅ha)]			127,00					642,00		
sehr geringer	f ₀ [l/(s⋅ha)]	393,50									
Differenzierungsgrad	f _E [l/(s⋅ha)]	384,50									

Tabelle A - 16: Gewählte Versickerungsparameter für fugenarmes Porenbetonpflaster bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung im Modell

FUGENARMES PORENBETONPFLASTER (FUGENANTEIL < 6%)												
Unterschreitungshäufigl	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100		
sehr hoher Differenzierungsgrad	f ₀ [l/(s·ha)]	5	120	180	360	670	1000	1500	2000	2800	3500	
	f_{E [l/(s} ⋅ha)]	5	100	160	340	650	1000	1500	2000	2800	3500	
hoher Differenzierungsgrad	f ₀ [l/(s·ha)]	62,5		270,0		835,0		1750,0		3150,0		
	f _E [l/(s⋅ha)]	52,5		250,0		825,0		1750,0		3150,0		
mittlerer Differenzierungsgrad	f ₀ [l/(s·ha)]	101,67			882		2,50		2766,67			
	f _E [l/(s⋅ha)]	88,33			872,50					2766,67		
geringer Differenzierungsgrad	f ₀ [l/(s·ha)]	267,00					2160,00					
	f _E [l/(s⋅ha)]			251,00					2160,00			
sehr geringer Differenzierungsgrad	f ₀ [l/(s·ha)]	1213,50										
	f _E [l/(s⋅ha)]	1205,50										



Abbildung A - 59: Prozentuale Abweichungen der rechnerischen Abflussvolumina gegenüber dem höchsten Differenzierungsgrad (D10) bei exemplarischen Einzelereignissen



Abbildung A - 60: Prozentuale Abweichungen der rechnerischen Abflussspitzen gegenüber dem höchsten Differenzierungsgrad (D10) bei exemplarischen Einzelereignissen



Abbildung A - 61: Prozentuale Abweichungen zwischen den Simulationsergebnisse bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung für Rasenpflaster bei variierenden Regenintensitäten





Abbildung A - 62: Prozentuale Abweichungen zwischen den Simulationsergebnisse bei unterschiedlicher Flächendifferenzierung für fugenarmes Porenbetonpflaster bei variierenden Regenintensitäten



Abbildung A - 63: Systemplan des entwässerungstechnischen Einzugsgebietes 'TU Kaiserslautern'

Anhang A-20: Regressionsansatz zur Erfassung des intensitätsabhängigen Versickerungsvermögens

Anhand der Abflussmessungen an Bestandflächen sowie der Lysimeterversuche konnte gezeigt werden, dass die Versickerungsleistung eines Pflasterbelages in hohem Maße von der Niederschlagsintensität bestimmt wird. Insbesondere 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 Zeit beschrieben werden kann.

In Abbildung A - 64 ist die Infiltrationsrate des fugenarmen Doppelverbundpflasters in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität für vier im Labor betrachtete Kolmationsgrade aufgetragen. Der Abbildung liegen dabei die Messergebnisse an einem Belag mit 2,5% Gefälle bei einer 20-minütigen Beregnung zugrunde. Die mit der Beregnungsintensität ansteigende Infiltrationsrate kann durch die ebenfalls in Abbildung A - 64 grafisch dargestellten Regressionsfunktionen näherungsweise beschrieben werden.





Die Regression erfolgt dabei über eine Funktion der Form:

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

- f: Infiltrationsrate in [l/(s·ha)] bei aktueller Regendauer D seit Ereignisbeginn
- r: Regenintensität in [l/(s·ha)]

- A: Regressionsparameter
- B: Regressionsparameter
- f_{max} : Endwert der Infiltrationsrate (nicht steigerbar; Bedingung: $f_{max} \le r$)

Unterstellt man ein von der Regendauer unabhängiges Versickerungsvermögen sind zur Beschreibung der momentanen Infiltrationsrate lediglich die drei o.g. Modellparameter erforderlich. In diesem Falle muss das zu Beginn eines Regenereignisses höhere Versickerungsvermögen über entsprechende erhöhte Anfangsverluste abgebildet werden.

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. Die Regressionsparameter A und B sind empirische Parameter. Der Kolmationsgrad wird über die Größe der gewählten Parameterwerte abgebildet.

Im Rahmen der Laborversuche nahm das Versickerungsvermögen mit der Versuchsdauer tendenziell leicht ab. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen kann der Ansatz erweitert werden. Dann ergibt sich für jede Dauerstufe sowie jeden Kolmationsgrad ein andere Regressionsfunktion mit entsprechend variierenden Zahlenwerten für die Parameter A und B. Auch der Parameter f_{max} nimmt mit fortlaufender Dauer eines Regenereignisses leicht ab.

Die Regressionsparameter A, B und f_{max} lassen sich ebenfalls durch einfache Funktionen näherungsweise beschreiben (Regression 2.Ordnung) und z.T. miteinander verknüpfen²²². Dies ermöglicht die Formulierung der Infiltrationsrate als geschlossene Funktion der Beregnungsintensität und der Zeit über sieben empirische Parameter. Die Gleichung zur Beschreibung der zeit- und intensitätsabhängigen Infiltrationsrate kann schließlich wie folgt ausgedrückt werden:

 $\begin{array}{lll} f(r,D) &=& \alpha_1 \cdot e^{\alpha_2 \cdot f_{max}(D)} \cdot ln(r,D) - \beta_1 \cdot \alpha_1 \cdot e^{\alpha_2 \cdot f_{max}(D)} + \beta_2 \leq f_{max}(D) \\ \\ mit \ f_{max} &=& \gamma_2 + (\gamma_1 - \gamma_2) \cdot e^{-D \cdot \mu + 0,5} \\ \\ f_{max} \colon & \ \mbox{Regressionsparameter 1. Ordnung} \\ \\ \alpha_{1,2}, \ \beta_{1,2} \colon & \ \mbox{Regressionsparameter 2. Ordnung} \\ \\ \gamma_1, \ \gamma_2, \ \mu \colon & \ \mbox{Regressionsparameter 2. Ordnung} \end{array}$

Die Zahlenwerte, die sich aus der Anpassung des Infiltrationsmodells an die Messwerte der Lysimeterversuche ergeben haben, sind im nachstehenden Abschnitt aufgeführt. Sie besitzen für den betrachteten Flächentyp eines fugenarmen Pflasterbelages bei einem Gefälle von 2,5% generelle Gültigkeit; nicht jedoch für einen anderen Belagstyp.

Die Abhängigkeit der Versickerungsrate vom Oberflächengefälle wird ebenso wie der Einfluss der Trockenperiode vor Regenbeginn in dem Algorithmus nicht explizit berücksichtigt.²²³ Vereinfachend können beide Einflussgrößen jedoch über Abminderungsfakto-

²²² ergänzende Erörterungen hierzu sind im Anhang enthalten

²²³ Für den Ansatz nach Horton gilt dies für den Einfluss des Oberflächengefälles analog.

ren erfasst werden. Vorschläge hierzu sind in Tabelle A - 19 und Tabelle A - 20 in nachfolgendem Abschnitt formuliert. Die Infiltrationsrate ergibt sich schließlich durch Multiplikation der Infiltrationsrate aus dem Regressionsansatz mit den Abminderungsfaktoren.

Der vorstehend beschriebene Algorithmus wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit speziell für einen fugenarmen Pflasterbelag mit einem Fugenanteil von rd. 5% abgeleitet und entwickelt, ist aber grundsätzlich auf alle Pflastertypen anwendbar. Exemplarisch wird die Anwendbarkeit auch für andere Flächentypen mit nachstehender Abbildung A - 65 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 A - 65: Gegenüberstellung gemessener und errechneter Infiltrationsraten für einen Plattenbelag mit einem Fugenanteil von 1,8% bei einer Regendauer von D = 30 min

Auch bei dem neu entwickelten Berechnungsansatz kann prinzipiell eine Staffelung der Parameterwerte zur Erfassung der Variabilität des Versickerungsvermögens vorgesehen werden. Auf die Erarbeitung umfassender Empfehlungswerte für die einzelnen Belagstypen wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet. Sie sollte jedoch bei der Weiterentwicklung des Ansatzes erfolgen. Ebenso stehen eine Evaluierung des Ansatzes bei der praktischen Anwendung und insbesondere ein Vergleich berechneter und gemessener Abflusswerte noch aus.

Der Vorteil des Ansatzes insbesondere auch gegenüber dem modifizierten Berechnungsansatz nach Horton/Paulsen besteht in der unmittelbaren Erfassung des Einflusses der Niederschlagsintensität auf die momentane Versickerungserleistung. Von Nachteil ist dagegen die höhere Anzahl an Modellparametern, die zudem weniger anschaulich sind als die Parameter des Horton-Ansatzes. Bei Vernachlässigung der Degression des Versickerungsvermögens über die Regendauer bzw. bei Ansatz eines von der Regendauer unabhängigen Versickerungsvermögens vereinfacht sich der Ansatz allerdings erheblich. Die Anzahl der Modellparameter reduziert sich in diesem Fall auf die drei Parameter A, B und f_{max} . Dennoch erfordert der Ansatz bis zur Anwendbarkeit bei Kontinuumssimulationen noch einige Entwicklungsarbeit.

Anhang A-21: Herleitung des Regressionsansatzes

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein im vorangegangenen Abschnitt skizzierter Berechnungsansatz entwickelt, über den das aktuelle Infiltrationsvermögen als Funktion der Niederschlagsintensität und der Zeit beschrieben werden kann. Der Berechnungsalgorithmus wurde i.W. aus den Lysimeterversuche abgeleitet und im vorangegangen Abschnitt kurz beschreiben. An dieser Stelle wird die Herleitung des Ansatzes dokumentiert.

Die mit der Beregnungsintensität ansteigende Infiltrationsrate kann durch die in Abbildung A - 66 grafisch dargestellten Regressionsfunktionen näherungsweise beschrieben werden. Für jede betrachtete Dauerstufe ergibt sich hierbei eine andere Regressionsfunktion, da die Infiltrationsrate mit andauernder Beregnung – zumindest im Rahmen der Laborversuche – tendenziell leicht abnimmt. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung A - 66 am Beispiel der Dauerstufen von 5, 15, 30 sowie 60 Minuten veranschaulicht.



Abbildung A - 66: Korrelation zwischen Infiltrationsrate und Niederschlagsintensität am Beispiel eines fugenarmen Verbundpflasters mit 2,5% Gefälle für verschiedene Dauerstufen zwischen 5 min und 60 min

Die Regression erfolgt dabei jeweils über eine Funktion der Form:

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

Für jede Dauerstufe ergibt sich für jeden Kolmationsgrad ein unterschiedliches Parameterpaar A und B. Die maximale Infiltrationsrate f_{max} entspricht hierbei 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 zur Anpassung der Regressionskurven an die Messwerte erforderlichen Parameterwerte für A, B und f_{max} für die einzelnen Dauerstufen sind in Abbildung A - 67 bis Abbildung A - 69 für das Beispiel des fugenarmen Verbundpflasters grafisch dargestellt. Die Parameterwerte weisen dabei über die Regendauer einen stetigen Verlauf auf, der ebenfalls durch Regressionskurven beschrieben werden kann (Regression zweiter Ordnung). Die für die einzelnen Parameter abgeleiteten Regressionsfunktionen sind ebenfalls in den Diagrammen aufgeführt.

Die Regressionsparameter lassen sich dabei durch folgende Funktionen mathematisch beschreiben:

- $A = a_2 + (a_1 a_2) \cdot e^{-D \cdot K + 0.75}$
- $B = b_2 + (b_1 b_2) \cdot e^{-D \cdot \lambda + 0.75}$

 $f_{max} = c_2 + (c_1 - c_2) \cdot e^{-D \cdot \mu + 0.5}$

a ₁ , a ₂ , κ:	Regressionsparameter 2. Ordnung zur Regression des Parameters A
b ₁ , b ₂ , λ:	Regressionsparameter 2. Ordnung zur Regression des Parameters B
C ₁ , C ₂ , μ:	Regressionsparameter 2. Ordnung zur Regression des Parameters fmax


Abbildung A - 67: Parameterwerte A zur Regression der Infiltrationsrate



Abbildung A - 68: Parameterwerte B zur Regression der Infiltrationsrate



Abbildung A - 69: Parameterwerte f_{max} zur Regression der Infiltrationsrate

Die Anpassung der Regressionsparameter zweiter Ordnung an die Parameter A, B und f_{max} zur Beschreibung der intensitäts- und zeitabhängigen Infiltrationsrate ergab die in Tabelle A - 17 aufgeführten Zahlenwerte.

Tabelle A - 17:	Zahlenwerte der Regressionsparameter zweiter Ordnung für einen
	fugenarmen Pflasterbelag (fugenarmes Verbundpflaster, 2,5% Gefälle)

Regressions- parameter 2. Ordnung	Neuzustand	mäßige Kolmation	ausgeprägte Kolmation	starke Kolmation			
		Parameter A					
a ₁	100	75	45	28			
a ₂	36	20	17	15			
κ	κ 0,0030 0,0030 0,0025						
Parameter B							
b ₁	400	250	125	60			
b ₂	30	20	17	15			
λ	0,0030	0,0030	0,0022	0,0022 0,0020			
Parameter f _{max}							
C ₁	350	250	185	100			
c ₂	175	90	70	60			
μ	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020			

Die Regression zweiter Ordnung ermöglicht die Formulierung der Infiltrationsrate als geschlossene Funktion der Beregnungsdauer und der Beregnungsintensität. Dabei werden insgesamt neun flächenspezifische Parameterwerte verwendet, die sich weder mit der Zeit bzw. der Regendauer noch mit der Beregnungsintensität ändern. Sie sind lediglich vom Flächentyp und dessen Kolmationsgrad abhängig.

Da die Regressionsparameter A, B und f_{max} einen sehr ähnlichen Verlauf über die Regendauer aufweisen, wurde untersucht, ob ein leicht formulierbarer mathematischer Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern besteht und zur Vereinfachung des Berechnungsalgorithmus ausgenutzt werden kann. Hierzu wurden die Parameterwerte untereinander korreliert. Das Ergebnis der Korrelationsanalyse ist in Abbildung A - 70 grafisch dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht, dass ein strenger Zusammenhang zwischen den Parameterwerten besteht.



Abbildung A - 70: Korrelation der Parameterwerte A, B und f_{max}

Die Korrelation zwischen den Parametern A und f_{max} lässt sich über eine einfache Exponentialfunktion beschreiben. Zwischen den Parametern A und B wurde ein linearer Zusammenhang gefunden.

A	=	$\alpha_1 \cdot e^{\alpha_2 \cdot f_{max}}$
В	=	$\beta_1 \cdot A - \beta_2$
А, В,	f _{max} :	Regressionsparameter 1. Ordnung
α1, α	λ ₂ :	Regressionsparameter 2. Ordnung zur Bestimmung des Parameters A
β1, β	b ₂ :	Regressionsparameter 2. Ordnung zur Bestimmung des Parameters B

Der mathematische Zusammenhang zwischen den Modellparametern A, B und f_{max} sowie dessen Abbildung durch die o.g. Regressionsfunktionen ist in den nachstehenden Schaubildern für unterschiedliche Kolmationsgrade dargestellt.



Abbildung A - 71: Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und f_{max} für einen Flächenbelag im Neuzustand



Abbildung A - 72: Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und f_{max} für einen Flächenbelag mit mäßigem Kolmationsgrad



Abbildung A - 73: Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und f_{max} für einen Flächenbelag mit ausgeprägtem Kolmationsgrad



Abbildung A - 74: Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und B für einen Flächenbelag im Neuzustand



Abbildung A - 75: Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und B für einen Flächenbelag mit mäßigem Kolmationsgrad



Abbildung A - 76: Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und B für einen Flächenbelag mit ausgeprägtem Kolmationsgrad



Abbildung A - 77: Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und B für einen Flächenbelag mit starkem Kolmationsgrad

Durch die Verknüpfung der Parameter A, B und f_{max} untereinander lässt sich die Gleichung zur Beschreibung der zeit- und intensitätsabhängigen Infiltrationsrate wie folgt ausdrücken:

 $\begin{array}{lll} f(r,D) &=& \alpha_1 \cdot e^{\alpha_2 \cdot f_{max}(D)} \cdot ln(r,D) - \beta_1 \cdot \alpha_1 \cdot e^{\alpha_2 \cdot f_{max}(D)} + \beta_2 \leq f_{max}(D) \\ \\ mit \ f_{max} &=& \gamma_2 + (\gamma_1 - \gamma_2) \cdot e^{-D \cdot \mu + 0.5} \\ \\ f_{max} \colon & \mbox{Regressionsparameter 1. Ordnung} \\ \\ \alpha_{1,2}, \ \beta_{1,2} \colon & \mbox{Regressionsparameter 2. Ordnung} \\ \\ \gamma_1, \ \gamma_2, \ \mu \colon & \mbox{Regressionsparameter 2. Ordnung} \end{array}$

Durch die Verknüpfung der Modellparameter konnten somit zwei Regressionsparameter zweiter Ordnung eliminiert werden. Das Infiltrationsmodell weist damit noch sieben flächenspezifische Parameter auf. Die Zahlenwerte, die sich aus der Anpassung des Infiltrationsmodells an die Messwerte der Lysimeterversuche ergeben haben, sind in Tabelle A - 18 zusammengestellt. Sie besitzen für den betrachteten Flächentyp eines fugenarmen Pflasterbelages bei einem Gefälle von 2,5% generelle Gültigkeit; nicht jedoch für einen anderen Belagstyp.

Regressions- parameter 2. Ordnung	Neuzustand	mäßige ausgeprägte Kolmation Kolmation		starke Kolmation
α1	112,9	9,7	9,4	5,5
α2	0,0058	0,0080	0,0087	0,0172
β1	5,8	4,2	4,0	3,5
β2	178	64	48	37
γ1	350	250	185	100
γ ₂	175	90	70	60
μ	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020

Tabelle A - 18:Zahlenwerte der Modellparameter des Infiltrationsmodells für einen
fugenarmen Pflasterbelag für verschiedene Kolmationsgrade

Die Abhängigkeit der Versickerungsrate vom Oberflächengefälle wird in dem Berechnungsansatz nicht explizit berücksichtigt, kann aber durch entsprechende Abminderungsfaktoren erfasst werden. Auf der Basis der im Rahmen dieser Arbeit analysierten Messungen wurden die in Tabelle A - 19 aufgeführten pauschalen Abminderungsfaktoren ζ_{J} formuliert.

Die Infiltrationsrate ergibt sich schließlich durch Multiplikation der Infiltrationsrate nach o.g. Gleichung mit dem pauschalen Abminderungsfaktor: $f(J,r,D) = f(r,D) \cdot \zeta_J$.

Gefälle	Neuzustand	mäßige Kolmation	ausgeprägte Kolmation	starke Kolmation
≤ 2,5%	1,15	1,10	1,05	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

Tabelle A - 19:	Abminderungsfaktoren ζ _J der Infiltrationsrate in Abhängigkeit vom
	Oberflächengefälle

Der Einfluss einer Trockenperiode vor Beregnungsbeginn auf das Infiltrationsvermögen kann bislang nicht eindeutig quantifiziert werden und kann daher nur sehr vereinfacht in den Berechnungsansatz integriert werden. Nach bisherigem Kenntnisstand kann eine ausgeprägte Vorbefeuchtung insbesondere das vergleichsweise hohe Infiltrationsvermögen zu Beginn eines Niederschlages unterbinden, da die Grobporen des Fugenmaterials noch eine nennenswerte Teilsättigung aufweisen. Auf das Infiltrationsvermögen nach einer Regendauer von 15-60 Minuten hat sie dagegen häufig eine geringere Auswirkung. Bis zum Vorliegen weiter gehender Erkenntnisse wird daher vorgeschlagen, den Sättigungszustand vereinfachend über das Verlustpotenzial auf der Oberfläche mit zu berücksichtigen.

Eine Alternative kann die Verknüpfung des Modellparameters f_{max} mit der Trockenperiode darstellen. Hierzu kann bspw. der Parameter analog der Vorgehensweise zur Berücksichtigung unterschiedlicher Gefällestufen mit einem Abminderungsfaktor ζ_{TP} belegt werden, der jedoch über die Regendauer variabel sein müsste. Ein erster Vorschlag zu möglichen Abminderungsfaktoren ist in Tabelle A - 20gegeben.

Regendauer	Dauer der Trockenperiode							
[]	0,5 h	1 h	2 h	4 h	8 h	12 h	18 h	24 h
5	0,60	0,80	0,90	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99
10	0,80	0,90	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99
		,						
15	0,90	0,95	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	,	,	,	,	,	,	,	,
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabelle A - 20:Vorschlag zur Höhe von Abminderungsfaktoren ζ_{TP} zur Berücksichtigung
der Vorgeschichte eines Regenereignisses

Dieser Abminderungsfaktor müsste bei der Simulation fortlaufend mitgeführt werden. Allerdings erscheint es nicht sinnvoll, dass rechnerisch jedes noch so intensitäts- oder volumenschwache Regenereignis zu einer Aktivierung des Abminderungsfaktors führt (wie es aber bspw. auch der bisherige Ansatz nach Horton tut). Daher müsste ein solcher Abminderungsfaktor an eine oder mehrere bestimmte Grenzwerte der Niederschlagsbelastung (Regenintensität oder Niederschlagshöhe) gekoppelt werden. Dieser Aspekt sollte im Zuge einer Weiterentwicklung des Modellkonzeptes unbedingt weiter untersucht werden.

Anhang A-22: Empfehlung flächenspezifischer Anfangsverlusthöhen

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	

Tabelle A - 21: Anfangsverlusthöhen durchlässig befestigter Flächentypen