

Quantifizierung des Abfluss- und Versickerungsverhaltens durchlässiger Flächenbeläge

Dr.-Ing. Marc Illgen

DAHLEM Beratende Ingenieure GmbH & Co. Wasserwirtschaft KG

Poststraße 9, 64293 Darmstadt

Kurzfassung:

Auf der Basis eines umfangreichen und aussagekräftigen Datenkollektivs wurde das Abfluss- und Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen analysiert, systematisiert, charakterisiert und quantifiziert. Darüber hinaus wurde ein verbesserter urbanhydrologischer Modellansatz entwickelt, mit dem sich das ereignisabhängige Abflussgeschehen weitaus realitätsnäher abbilden lässt als mit den bislang gängigen Simulationsansätzen. Mit den erarbeiteten Kennwerten und Bemessungshilfen wird eine deutlich verbesserte, sehr kompakte und zugleich durch umfangreiche Messungen und Analysen abgesicherte Grundlage zur Bewertung des Versickerungsvermögens durchlässig befestigter Siedlungsflächen bereit gestellt. Die erarbeiteten Empfehlungswerte und Bemessungsnomogramme spiegeln die vollzogene Neubewertung des Versickerungsvermögens für verschiedene Flächenbefestigungen wider, die sich im Vergleich zum bisherigen Kenntnisstand teilweise vielfach in höheren, vereinzelt aber auch in geringeren Infiltrationsraten äußert.

Key-Words:

Abflussbeiwert, HYDRUS-2D, Infiltrometer, Pflaster, Versickerungsrate

1 Hintergrund und Problemstellung

Versickerungsfähige Flächenbefestigungen sind allgegenwärtig und auf nahezu jedem Grundstück anzutreffen. Bezogen auf das kanalisierte Einzugsgebiet liegt ihr Flächenanteil je nach städtebaulichen Gegeben-

heiten in einer Größenordnung von 20%-60% [1]. Dabei kommen diverse Befestigungsarten mit ganz unterschiedlichem Versickerungsvermögen zum Einsatz. Meist handelt es sich um Pflaster- bzw. Plattenbeläge, wobei konventionelle, fugenarm verlegte Pflasterbeläge nach wie vor und mit Abstand am häufigsten vorkommen [2].

Der Niederschlagsabfluss von der Siedlungsoberfläche stellt die zentrale Berechnungsgröße in der Siedlungsentwässerung dar, sei es bei der Dimensionierung einzelner Anlagen, der Bewertung des Überflutungsschutzes oder im Hinblick auf die Erhebung von Niederschlagswassergebühren. Angesichts der Verfügbarkeit hoch detaillierter digitaler Einzugsgebietsdaten und gestiegener Rechnerkapazitäten werden heute schon sehr hohe Anforderungen an die Planungsgenauigkeit gestellt. Zukünftig werden Planer von Entwässerungssystemen überdies gefordert sein, das Abfluss- und Versickerungsverhalten nicht bzw. durchlässig befestigter Flächen innerhalb von Siedlungsgebieten stärker als bislang zu berücksichtigen [3]. Die Quantifizierung des Abflussbeitrages durchlässig befestigter Siedlungsflächen ist jedoch bisher mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, da fundierte und ausreichend differenzierte Kennwerte zum Versickerungsvermögen ebenso fehlten wie adäquate urbanhydrologische Berechnungsmethoden. Dieser Mangel ist Ausdruck des ausgeprägten Kenntnisdefizites zum spezifischen Versickerungsverhalten technisch hergestellter Flächenbefestigungen, das sich deutlich von natürlichen oder gänzlich unbefestigten Flächen unterscheidet.

Wie viel Regenwasser kann auf einem konventionellen Verbundpflasterbelag versickern? Wie viel auf einem Porenbetonpflaster? Welche Rolle spielt die Durchlässigkeit des Untergrundes? Welchen Einfluss hat das Oberflächengefälle? Und welche Versickerungsleistung wird auch nach vieljähriger Nutzung noch erreicht? Dies alles sind Fragen, die man bislang nicht qualifiziert beantworten oder anhand von Messungen mit konkreten und belastbaren Zahlenwerten untermauern konnte. Die Fülle der offenen Fragen war Veranlassung für ein umfangreiches Forschungsprojekt, über dessen wesentliche Ergebnisse und Erkenntnisse hier berichtet wird.

2 Untersuchung des Versickerungsverhaltens von Pflasterflächen

Auf Initiative und unter Federführung des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern wurde das Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen in einem mehrjährigen Forschungsprojekt und unter Mitwirkung verschiedener Kooperationspartner eingehend und umfassend untersucht [4]. Finanziell gefördert wurde das Forschungsvorhaben vom Umweltministerium des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW). Die wesentlichen Zielsetzungen des Forschungsprojektes waren:

- Der Gewinn vertiefter Kenntnisse zum Versickerungsverhalten versickerungsfähiger Flächenbefestigungen
- Die Charakterisierung und Quantifizierung des bauartspezifischen Versickerungsvermögens
- Die Erarbeitung repräsentativer Kennwerte und Planungshilfen
- Die Entwicklung eines verbesserten urbanhydrologischen Berechnungsmodells.

Den Kern der Gesamtuntersuchung bilden mehrere hundert Messungen an Bestandsflächen sowie Beregnungsversuche an einer Lysimeteranlage. Das betrachtete Flächenspektrum reicht von konventionellen Platten- und Pflasterbelägen bis hin zu Rasen-, Porenbeton- und Sickerfugenpflaster. In die Analyse und Bewertung des Versickerungsverhaltens eingeflossen sind u.a.:

- 360 Infiltrationsmessungen an Bestandsflächen nach langjähriger Nutzung
- Abflussmessungen über mehrere Jahre an 40 real genutzten Testfeldern (FH Osnabrück, [5])
- 140 Beregnungsversuche an einem Lysimeter mit systematischer Variation einzelner Randbedingungen (IKT, Gelsenkirchen)
- Numerische Simulationen der Strömungsvorgänge im Flächenaufbau
- Urbanhydrologische Vergleichssimulationen an Einheitsflächen sowie für reale und fiktive Einzugsgebiete

Zur Analyse des Versickerungsverhaltens wurde bewusst ein ganzheitlich ausgerichteter Forschungsansatz gewählt, der zahlreiche wissenschaftliche Methoden kombiniert und vielfältige Blickrichtungen ermöglicht. Durch die Überlagerung von eigens erhobenen Messdaten mit den Messdaten aus früheren Untersuchungen anderer Forschergruppen (i. W. [6], [7], [8], [9]) konnte ein äußerst umfassendes Datenkollektiv geschaffen werden. Den betreffenden Kollegen gilt unser besonderer Dank für den in wissenschaftlichen Kreisen nicht selbstverständlichen Support.

Anhand der Infiltrationsmessungen wurden Kenntnisse zum Versickerungsvermögen verschiedener Pflasterbauarten im Gebrauchszustand gesammelt. Hierbei wurden Messergebnisse aus eigenen Erhebungen mit den Ergebniswerten früherer Untersuchungen anderer Forschergruppen (i.W. [10], [11], [12], [13]) in einem Datenpool überlagert und statistisch ausgewertet. Die Untersuchungsergebnisse 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. Ferner wurde der Einfluss wesentlicher baulicher und standortspezifischer Randbedingungen auf das Versickerungsvermögen analysiert und quantifiziert.

Weitere Erkenntnisse zu Versickerungsphänomenen und maßgeblichen die Versickerungsleistung bestimmenden Einflussfaktoren wurden durch die Analyse von Abflussmessungen auf einem Versuchsfeld in Lingen (Ems) gesammelt, die von der Fachhochschule Osnabrück [14] erhoben wurden und im Rahmen des Forschungsvorhaben mit besonderem Blickwinkel erneut ausgewertet wurden. Hierbei konnte insbesondere der Einfluss der Niederschlagsbelastung sowie verschiedener baulicher Randbedingungen wie Gefälle, Materialeigenschaften der mineralischen Baustoffe und Planumsdurchlässigkeit analysiert und bewertet werden.

Im Rahmen von Laborversuchen an einer Lysimeteranlage konnten die hydrologischen und bodenhydraulischen Prozesse, die auf und in der Pflasterkonstruktion ablaufen, beobachtet und analysiert werden. In rund 140 Beregnungsversuchen wurden insbesondere der Einfluss des Feinpartikeleintrages in die Deckschicht, der Niederschlagsbelastung und

des Oberflächengefälles für verschiedene Pflaster- und Plattenbauweisen systematisch untersucht und quantifiziert.

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. In zahlreichen Vergleichssimulationen wurden die Ergebnisse der messtechnischen Beprobungen verifiziert und Detailphänomene analysiert.

Auf der Basis der Messergebnisse wurde das Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen schließlich allgemein charakterisiert und anhand bauartspezifischer Kennwerte zahlenmäßig bewertet. Wesentliche Einflussfaktoren auf die Versickerungsleistung wurden analysiert, systematisiert und quantifiziert.

3 Charakteristika des Versickerungsverhaltens von Pflasterflächen

Das Versickerungsvermögen einer wasserdurchlässig ausgebildeten Flächenbefestigung hängt von zahlreichen baulichen und äußeren Einflussfaktoren wie bspw. dem Fugenanteil und dem verwendeten Fugenmaterial, dem Oberflächengefälle oder auch der Nutzung der Fläche ab. Den dominierenden Einfluss aber übt die sog. Kolmation einer Fläche aus: Im Laufe der Standzeit bilden Feinpartikel an der Oberfläche eines versickerungsfähigen Belages bzw. in seinem Fugenraum eine Schlämmschicht und reduzieren das Versickerungsvermögen mitunter ganz erheblich.

Je nach Standort, Liegezeit und Nutzung kann dieser Vorgang in ganz unterschiedlicher Ausprägung auftreten und führt dazu, dass die Versickerungsleistung nach mehrjähriger Nutzung – auch kleinräumig und scheinbar zufällig – in einem ganz erheblichen Wertebereich schwanken kann. Näherungsweise lassen sich den verschiedenen Flächenbauweisen die in nachstehender Grafik dargestellten Versickerungsleistungen in Verbindung mit einer statistischen Häufigkeit zuweisen. Einzelnen Häufigkeitsbereichen wurden zudem zugehörige Kolmationsgrade qualitativ zugeordnet (Abbildung 1).

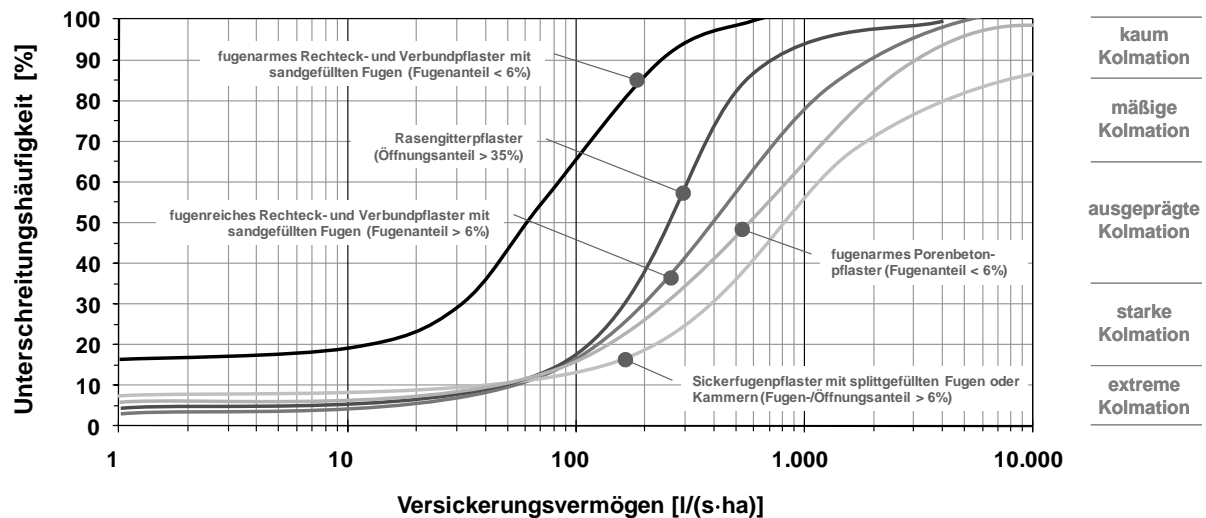


Abbildung 1: Häufigkeitsverteilungen des Versickerungsvermögens gängiger Pflasterarten

Die Grafik dokumentiert die enorme Variabilität des Versickerungsvermögens über 2-3 Zehnerpotenzen hinweg. Dabei überrascht, dass ein konventionelles Funktionspflaster ein durchaus beachtliches Versickerungsvermögen von durchschnittlich $55 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ aufweist. Die Versickerungsleistung begrünter Rasengitterbeläge bleibt dagegen deutlich hinter dem Versickerungsvermögen von Sickerfugen- oder Porenbetonpflaster zurück. Die Grafik verdeutlicht aber auch, dass bei allen Pflasterbauarten auf 5 – 20 % der Flächen die Kolmation derart ausgeprägt ist, dass dort nahezu kein Regenwasser versickern kann.

Der bodenphysikalische Prozess der Versickerung ist gekennzeichnet von anfänglich i.d.R. sehr hohen Infiltrationsraten, die aus der Auffüllung der Grobporen in der Fugenfüllung resultieren und den k_f -Wert des Fugenmaterials deutlich übersteigen. Innerhalb von wenigen Minuten (ca. 5 – 15 min) reduziert sich dann die Infiltrationsrate auf ein nahezu konstantes Niveau, das sich auch bei langanhaltenden Niederschlägen nicht weiter ändert, sofern sich auch die Regenintensität nicht nennenswert ändert. Mit zunehmender bzw. abnehmender Regenintensität hingegen nimmt die momentane Versickerungsrate deutlich zu bzw. ab. Dies führt u. a. dazu, dass selbst bei vergleichsweise geringen Niederschlagsintensitäten bereits ein merklicher Oberflächenabfluss einsetzen kann, obwohl der Belag im Stande ist, bei höheren Regenintensitäten noch weitaus mehr Wasser aufzunehmen. Ein fester

Schwellenwert, ab dem ein Oberflächenabfluss einsetzt, lässt sich nicht angeben.

Im Pflasteraufbau herrschen während des Versickerungsvorganges sehr inhomogene Strömungsverhältnisse. Während der Fugenraum nahezu vollständig gesättigt ist, findet in der Bettungs- und v. a. in der Tragschicht nur eine mäßige Aufsättigung statt. Wassergehalte von über 20 % werden hier aufgrund des hohen Wassertransportvermögens selten erreicht. Darüber hinaus weisen die Bettungs- und die Tragschicht ein enormes Speichervermögen auf. Je Zentimeter Mächtigkeit verfügen die grobkörnigen Mineralstoffgemische über ein Speichervermögen von ca. 3 – 4 mm infiltrierender Niederschlagshöhe. Selbst bei geringen Mächtigkeiten der Unterlage von lediglich 10 – 15 cm, wie sie auf privaten Flächen häufig anzutreffen sind, steht bereits eine Speicherkapazität von 30 – 60 mm Niederschlagshöhe zur Verfügung, die nur bei seltenen Regenereignissen ausgeschöpft wird. Dies bedingt auch, dass – entgegen der landläufigen Meinung – die Durchlässigkeit des Planums bzw. des anstehenden Untergrundes von untergeordneter Bedeutung ist und kaum Einfluss auf das Versickerungsvermögen des Pflasteraufbaus hat.

Das Oberflächengefälle hat im Vergleich zur Kolmation einen moderaten Einfluss auf das Versickerungsvermögen. Gegenüber 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 Versickerungsraten. 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. Je nach Pflastertyp, Kolmationsgrad und Niederschlagsbelastungen können jedoch von diesen Näherungswerten erheblich abweichende Werte auftreten.

4 Bauartspezifische Kennwerte

Auf der Grundlage des umfangreichen Datenkollektivs wurden bauartspezifische Kennwerte des Versickerungsvermögens abgeleitet. Die Zahlenwerte tragen dem Einfluss wesentlichster Randbedingungen Rechnung (Kolmation, Regenintensität, Gefälle, Liegezeit, Flächennutzung). Exemplarische Kennwerte mit einer Differenzierung nach der Unterschreitungshäufigkeit, dem Oberflächengefälle sowie der Regenintensität sind in den nachstehenden Tabellen aufgeführt. Weitere Kenn- und Empfehlungswerte bauartspezifischer Versickerungsraten mit Differenzierungen nach weiteren Randbedingungen sind u.a. in [4, 15, 16] zu finden.

Die Tabellen liefern eine Systematisierung des räumlich und bauartspezifisch in erheblichem Maße variierenden Versickerungsvermögens, in dem sie unterschiedlichen Flächencharakteristika und Einflussfaktoren entsprechende Versickerungskapazitäten zuordnen. 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.

Tabelle 1: Bauartspezifische Kennwerte des Versickerungsvermögens in Abhängigkeit von der Auftretenswahrscheinlichkeit

Flächentyp			Unterschreitungshäufigkeit				
			≤ 10%	25%	50%	75%	≥ 90%
Befestigungsart	Fuganteil	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
Pflasterbelag aus Porenbeton	- -	- -	≤ 50	175	500	1.500	≥ 3.000
Pflasterbelag mit Sickerfugen od. Kammern	> 4,5 %	Splitt	≤ 50	300	850	2.500	≥ 5.000

Tabelle 2: Kennwerte des Versickerungsmögens in Abhängigkeit von der Regenintensität bei ausgeprägter Kolmation

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

Tabelle 3: Bauartspezifische Kennwerte des Versickerungsmögens in Abhängigkeit vom Oberflächengefälle

Flächentyp			Oberflächengefälle				
			< 2,5%	2,5%	5,0%	7,5%	> 7,5%
Befestigungsart	Fuganteil	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	- -	- -	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
Pflasterbelag aus Porenbeton	- -	- -	330 - 1.100	300 - 1.000	275 - 950	250 - 875	225 - 800
Pflasterbelag mit Sickerfugen od. Kammern	> 4,5 %	Splitt	550 - 1.300	500 - 1.200	475 - 1.100	450 - 1.000	400 - 900

Gleichwohl wird mit den erarbeiteten Versickerungskennwerten eine deutlich breitere und zugleich durch umfangreiche Messungen und Analysen abgesicherte Grundlage zur quantitativen Bewertung des Versickerungsvermögens wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen bereit gestellt. Die ausgewiesenen Zahlenwerte erweitern auch die Empfehlungswerte von Schmitt und Illgen [17] bzw. der DWA-Arbeitsgruppe ES-2.6 [3]. Zum Teil widersprechen sie diesen Empfehlungswerten aber auch in gehörigem Maß, was angesichts der zwischenzeitlich enorm gewachsenen Datengrundlage und des beträchtlich gestiegenen Kenntnisstandes jedoch nicht überraschen kann. Die bisherigen Empfehlungen mussten sich 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 und vielfach als zu hoch kritisiert werden (z. B. [18], [19]).

Die Kennwerte liefern darüber hinaus Hinweise, wie das Versickerungsvermögen der unterschiedlichen Befestigungstypen bei der Erhebung gesplitteter Abwassergebühren bewertet bzw. berücksichtigt werden kann. Eine ausführliche Bewertung hierzu enthält [20].

5 Bauartspezifische Abflussbeiwerte

Aufbauend auf den vorgenannten Kennwerten zum bauartspezifischen Versickerungsvermögen wurden für das gängige Flächenspektrum bauartbezogene Abflussbeiwerte in Form von Bemessungsnomogrammen sowie Parameterempfehlungen zur urbanhydrologischen Simulation erarbeitet und durch Vergleichsrechnungen an realen und fiktiven Einzugsgebieten verifiziert. Die Empfehlungswerte spiegeln den zu erwartenden Wertebereich je nach Kolmationsgrad, Niederschlagsintensität und Oberflächengefälle wider. Exemplarische Nomogramme sind nachfolgend aufgeführt (Abbildung 2 und 3); weitere Nomogramme sind u. a. in [4, 15, 16] zu finden.

Die empfohlenen Werte sind als mittlere Abflussbeiwerte sowie als Spitzenabflussbeiwerte zur Bemessung anwendbar. Die unterschiedlichen Definitionen der verschiedenen Abflussbeiwerte sind hierbei nur

von untergeordneter Bedeutung, zumal die Abflussbeiwerte überwiegend in Kombination mit Blockregen verwendet werden. Generell wird zwischen fünf verschiedenen Kolmationsgraden unterschieden. 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 1 ausgewiesene Zuordnung der verschiedenen Kolmationsgrade zu den statistischen Unterschreitungshäufigkeiten gewählt wurden.

Die Wahl des Kolmationsgrades bzw. einer angemessenen Unterschreitungshäufigkeit muss vom Fachplaner je nach Aufgabenstellung, örtlichen Randbedingungen und damit verbundener Risikobewertung getroffen werden. Eine pauschale Vorgabe bzw. Empfehlung kann hier nicht ausgesprochen werden. In den meisten Fällen empfiehlt es sich jedoch, eine ausgeprägte bis starke Kolmation anzusetzen. Die relevante Niederschlagsbelastung ergibt sich unmittelbar aus dem jeweiligen Anwendungsfall.

Abbildung 2 zeigt Nomogramme für konventionelle, fugenarm verlegte Pflasterbeläge aus gefügedichten Natur- oder Betonsteinen, die Fugenweiten ≤ 5 mm aufweisen und deren Fugen mit sandigen Aggregaten verfüllt sind (z. B. gängiges Rechteck- und Verbundpflaster). Bei Pflasterbauweisen mit splittverfüllten Fugen ist dagegen ein deutlich höheres Versickerungsvermögen zu erwarten (siehe Abbildung 3).

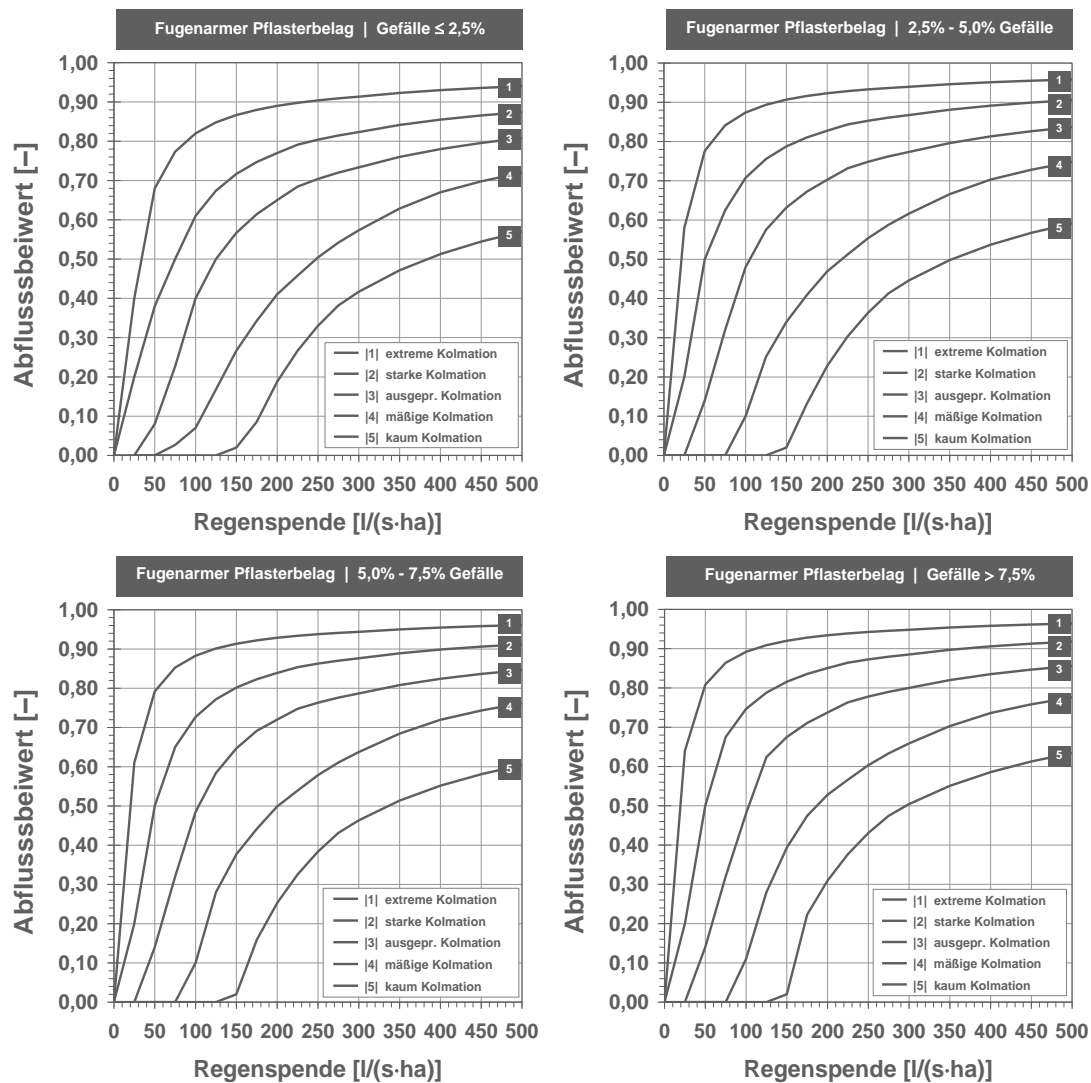


Abbildung 2: Abflussbeiwert-Nomogramme für fugenarm verlegte Pflasterbeläge (Fugenteil 3 – 6 %)

Die Grafiken verdeutlichen die enorme Bandbreite, die der Abflussbeiwert selbst für diesen insgesamt mäßig durchlässigen Belagstyp einnehmen kann. Sie unterstreichen damit die gebotene Differenzierung nach Regenintensität und Flächenzustand.

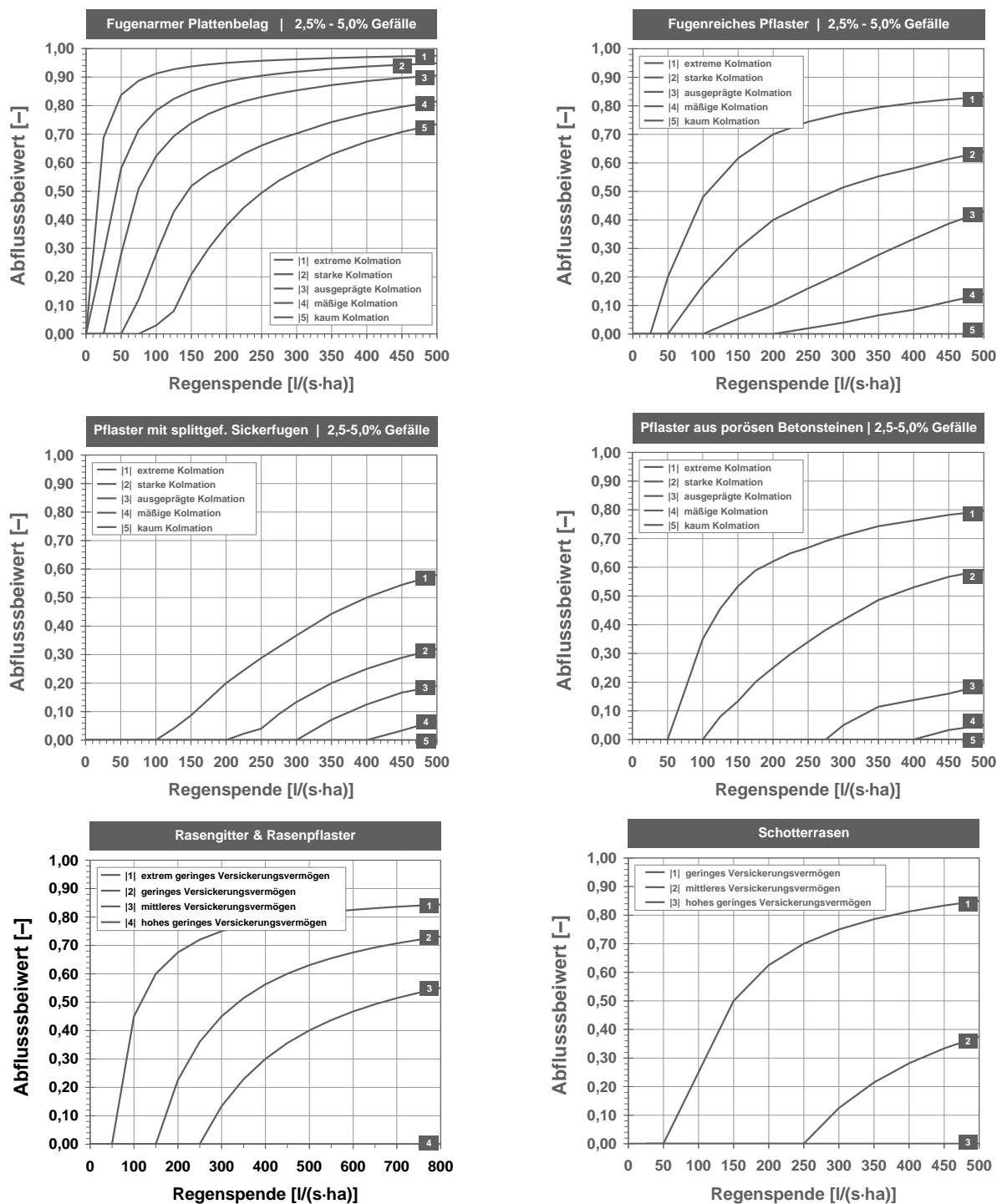


Abbildung 3: Abflussbeiwert-Nomogramme für verschiedene Pflasterbeläge

6 Parameterempfehlung zur Abflusssimulation

Der Berechnungsansatz nach Horton stellt trotz erheblicher Defizite in Bezug auf versickerungsfähig ausgebildete Flächenbefestigungen bis auf Weiteres die dominierende Berechnungsmethode zur Ermittlung des Oberflächenabflusses im Zuge von Niederschlags-Abfluss-Simulationen dar. Aus diesem Grund werden nachfolgend Empfehlungen zu geeigneten Parameterwerten ausgesprochen.

Der Ansatz nach Horton verwendet vier Modellparameter: Die Anfangsversickerungsrate f_0 , die Endversickerungsrate f_e , den Abnahmekoeffizienten k sowie den Regenerationskoeffizienten k_D .

Die Anfangs- und die Endfiltrationsraten nach Horton können prinzipiell unmittelbar aus den bekannten Versickerungskapazitäten abgeleitet werden. Als Orientierungswerte können die in den Tabellen 1 – 3 ausgewiesenen Versickerungsrate herangezogen werden. Insbesondere anhand der Tabelle 2 ist die Wahl von dem relevanten Regenspektrum angemessener Zahlenwerte möglich. Die je Flächentyp dort angegebenen Kennwerte erstrecken sich mitunter über einen großen Wertebereich und spiegeln die hohe Variabilität im Versickerungsvermögen der betrachteten Befestigungsarten wieder. Dies lässt einigen Spielraum für den Anwender. Gleichwohl wird empfohlen, Zahlenwerte zwischen dem unteren Drittel und dem Mittelwert der angegebenen Wertespanne zu wählen. Generell sollte von einer ausgeprägten oder starken Kolmation ausgegangen werden.

Der Ansatz von Horton ist jedoch weder in der Lage das örtlich sehr heterogene Versickerungsvermögen noch die mit der Niederschlagsintensität de facto variierende Infiltrationsleistung widerzuspiegeln. Bei der Betrachtung unterschiedlicher Niederschlagsbelastungen wären folglich unterschiedliche Versickerungsraten anzusetzen. Während dies bei der Berechnung von Einzelereignissen prinzipiell möglich ist, muss im Rahmen von Kontinuumssimulationen ein fester Parametersatz gewählt werden. Je nach Anforderung und Ziel der Planungsaufgabe muss dann entsprechend der dabei im Vordergrund stehenden Ereignischarakteristik ein geeigneter Parametersatz ausgewählt werden.

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. Zur Modellierung ist es daher ausreichend, die hohen Anfangsversickerungsraten durch entsprechende Anfangsverluste abzubilden und für Anfangs- und Endversickerungsrate jeweils identische Zahlenwerten anzusetzen.

Tabelle 4: Empfohlene Anfangsverlustrhöhen durchlässig befestigter Flächentypen

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

Alternativ kann im Ansatz nach Horton der Rückgang in der Versickerungsrate über den Abnahmekoeffizient k beschrieben werden. Zur Anwendung auf wasserdurchlässige Flächenbefestigungen sollten dann Zahlenwerte in einer Größenordnung von $0,10 - 0,50 \text{ min}^{-1}$ verwendet werden. Darüber hinaus werden in diesem Fall Zahlenwerte für den Parameter k_D zur Beschreibung der Regeneration des Versickerungsvermögens in niederschlagsfreien Perioden benötigt. In der Fachliteratur werden hier Werte im Bereich von $0,0001 - 0,001 \text{ min}^{-1}$ genannt. Bei wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Grobporen in der Deckschicht ver-

gleichsweise rasch nach Ende eines Regenereignisses wieder entleeren und sich somit das Anfangspotenzial entsprechend schnell regenerieren kann. Für den Regenerationskoeffizienten wird daher ein Wertebereich von $0,0005 - 0,002 \text{ min}^{-1}$ empfohlen. Dadurch wird sichergestellt, dass rechnerisch nach einer Trockenperiode von 24 Stunden die Anfangsver-sickerungsrate zu rd. 50 % – 90 % wieder erreicht wird; nach 36 Stunden zu rd. 75 % – 100 %. Geringere Zahlenwerte führen dagegen dazu, dass sich das Anfangspotenzial erst nach mehreren Tagen wieder aufbauen würde.

Im Hinblick auf die Abflussberechnung ganzer Einzugsgebiete erscheint es ausreichend, einheitlich für sämtliche durchlässig befestigten Siedlungsflächen pauschale Versickerungsparameter in der Größenordnung der Empfehlungswerte für konventionelles fugenarmes Pflaster anzusetzen. Eine Differenzierung in Flächenkategorien unterschiedlichen Versickerungsvermögens ist angesichts der klar dominierenden Anteile konventioneller Pflasterbeläge und der vorhandenen Defizite im Berechnungsansatz nach Horton nicht gerechtfertigt.

7 Konzeption eines weitergehenden Modellansatzes

Die bislang gängigen urbanhydrologischen Berechnungsansätze zur Simulation des Abflussbeitrages durchlässig befestigter Siedlungsflächen sind nicht in der Lage, das Abfluss- und Versickerungsverhalten sachgerecht abzubilden. Aus diesem Grunde wurde versucht, auf der Grundlage der generierten Messdaten und den daraus gewonnen Erkenntnissen einen verbesserten urban-hydrologischen Modellbaustein zu konzipieren.

Es wurde ein bi-direktionales Schichtenmodell entworfen, das in seiner Systemlogik dem prinzipiellen Aufbau einer versickerungsfähig ausgebildeten Flächenbefestigung folgt, die sich aus einer teildurchlässigen Deckschicht und einer vlldurchlässigen 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 nachstehender Abbildung 4 veranschaulicht.

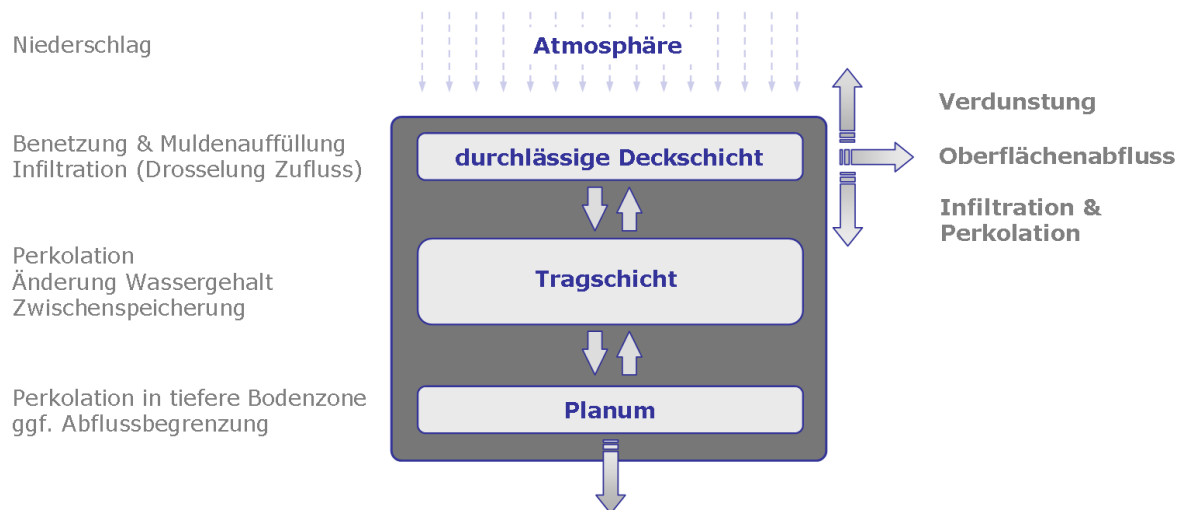


Abbildung 4: Bi-direktionales Schichtenmodell

Den Kern des Modellkonzepts bildet ein Infiltrationsmodul, bei dem das Versickerungsvermögen entsprechend der in Abbildung 1 dargestellten Häufigkeitsverteilung gestaffelt wird. Hierzu werden modellintern die 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 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 wiederzugeben.

Das Prinzip der gestaffelten Versickerungsleistung ist für verschiedene Diskretisierungsstufen in Abbildung 5 veranschaulicht.

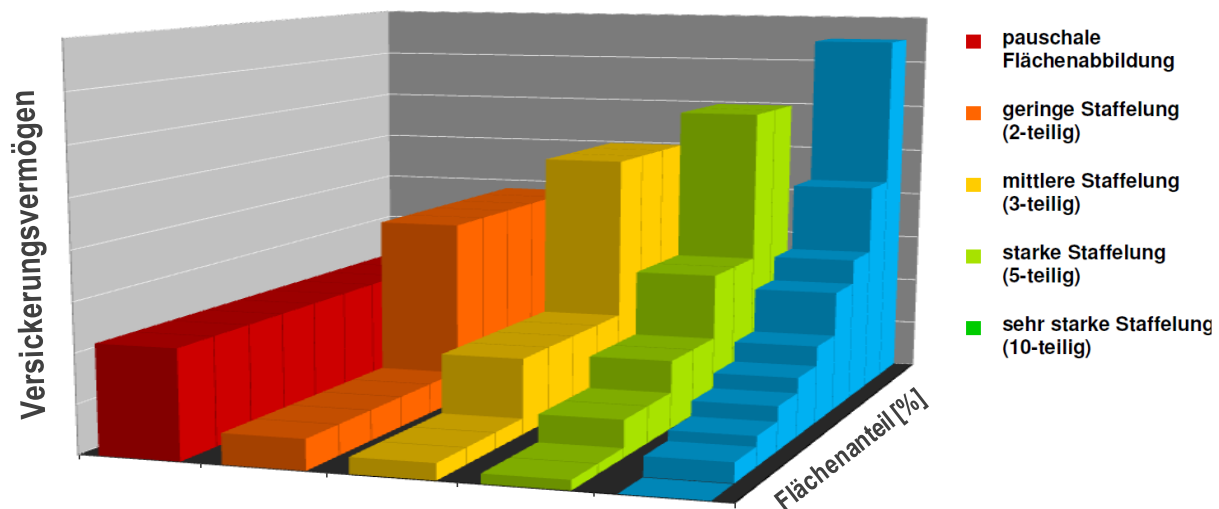


Abbildung 5: Staffelung der Versickerungsvermögen über ein Flächenelement

Mit der Staffelung der Parameterwerte wird erreicht, dass auch rechnerisch das stochastisch geprägte Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen und die daraus resultierende extreme Variabilität der Versickerungsleistung näherungsweise erfasst werden. Gleichzeitig wird das mit der Niederschlagsintensität ansteigende Versickerungsvermögen ebenso im Modell wiedergegeben, wie das Aufkommen von geringen Oberflächenabflüssen bereits bei vergleichsweise intensitätsschwachen Regenereignissen. Bei der Wahl der jeweiligen Versickerungsparameter kann sich wiederum an den in Abbildung 1 skizzierten Zahlenwerten orientiert werden.

Trotz und vielleicht auch gerade wegen seiner Einfachheit hat sich der Ansatz als äußerst effektiv erwiesen und wird daher ausdrücklich zur weiteren programmtechnischen Umsetzung empfohlen.

8 Zusammenfassung und Fazit

Pflasterflächen sind in der Lage, dauerhaft und weitgehend unabhängig vom Untergrund Regenwasser am Abfluss zu hindern. Selbst konventionelles Funktionspflaster verfügt über ein durchaus beachtliches Versickerungsvermögen. Versickerungsfähig gestaltete Siedlungsflächen liefern damit einen wichtigen Beitrag, der Versiegelung urbaner Räume hinsichtlich ihrer abflussverschärfenden Wirkung entgegen-

zuwirken und stellen auch ein geeignetes Mittel zu besseren Adaptionen unserer Städte und Entwässerungssysteme an die Folgen der Klima-veränderungen dar.

Auf der Basis eines umfangreichen und aussagekräftigen Datenkollektivs wurde das Abfluss- und Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen analysiert, systematisiert, charakterisiert und quantifiziert. Mit den erarbeiteten Kennwerten und Bemessungshilfen wird eine deutlich verbesserte, sehr kompakte und zugleich durch umfangreiche Messungen und Analysen abgesicherte Grundlage zur Bewertung des Versickerungsvermögens durchlässig befestigter Siedlungsflächen bereit gestellt.

Die Empfehlungswerte und Bemessungsnomogramme können Planern als wertvolle Hilfestellung zur Abschätzung der zu erwartenden Regenwasserabflüsse dienen und unterstützen damit die sachgerechte und wirtschaftliche Dimensionierung von Entwässerungsanlagen. Sie ermöglichen überdies, das stark variierende Versickerungsvermögen der verschiedenen Befestigungsarten auch im Rahmen gesplitteter Abwassergebühren sachgerecht zu berücksichtigen.

9 Literatur

- [1] 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.
- [2] SLG (2004): Marktdatenerhebung der Fachvereinigung Betonprodukte für Straßen-, Landschafts- und Gartenbau e.V., Bonn 2004.
- [3] 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.
- [4] Illgen, M. (2009): Das Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen und seine urbanhydrologische Quantifizierung, Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, Band 27.

- [5] 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.
- [6] Krass, K., Radenberg, M und Buscham, B. (2007): Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von Pflasterflächen, unveröffentlichte Dokumentation der Untersuchungsergebnisse.
- [7] 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>).
- [8] 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/>).
- [9] 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.
- [10] Krass, K., Radenberg, M und Buscham, B. (2007): Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von Pflasterflächen, unveröffentlichte Dokumentation der Untersuchungsergebnisse.
- [11] 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>).
- [12] 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/>).
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] Illgen, M. (2009): Versickerung von Regenwasser auf Pflasterflächen – Kennwerte und Bemessungshilfen. Umdruck der 8. DWA Regenwassertage, 27./28. Mai 2009, Dortmund.
- [16] Illgen, M. (2009): Das Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen und seine urbanhydrologische Quantifizierung.
http://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor.php?source_opus=2326.
- [17] Schmitt, T.G. und Illgen, M. (2001): Abflussbeiwerte für die Bemessung und Abflusssimulation von Entwässerungsanlagen, KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, 48. Jg., Dezember 2001, S. 1720-1728.
- [18] Borgwardt, S. (1994): Der Abflussbeiwert – Kritische Anmerkungen zur DIN 1986 Teil 2, Das Gartenamt 11/94; S. 756-760.
- [19] Timmermann, U. (2001): Beurteilung wasserdurchlässiger Verkehrsflächen, Wasser und Abfall, Ausg. 1/2, S. 22-24.
- [20] Illgen, M. (2009): Gebührenerhebung für Pflasterflächen, Gemeinde und Stadt, Heft 4/2009, GStB Rheinland-Pfalz, S.108-110.
- [21] Schmitt, T.G. und Illgen, M. (2001): Abflussbeiwerte für die Bemessung und Abflusssimulation von Entwässerungsanlagen, KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, 48. Jg., Dezember 2001, S. 1720-1728.
- [22] 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.

Korrespondenz an:

Dr.-Ing. Marc Illgen

DAHLEM Beratende Ingenieure
GmbH & Co. Wasserwirtschaft KG

Poststraße 9
64293 Darmstadt

Tel.: +49 (0)6151 8595 0

@: m.illgen@dahlem-ingenieure.de

