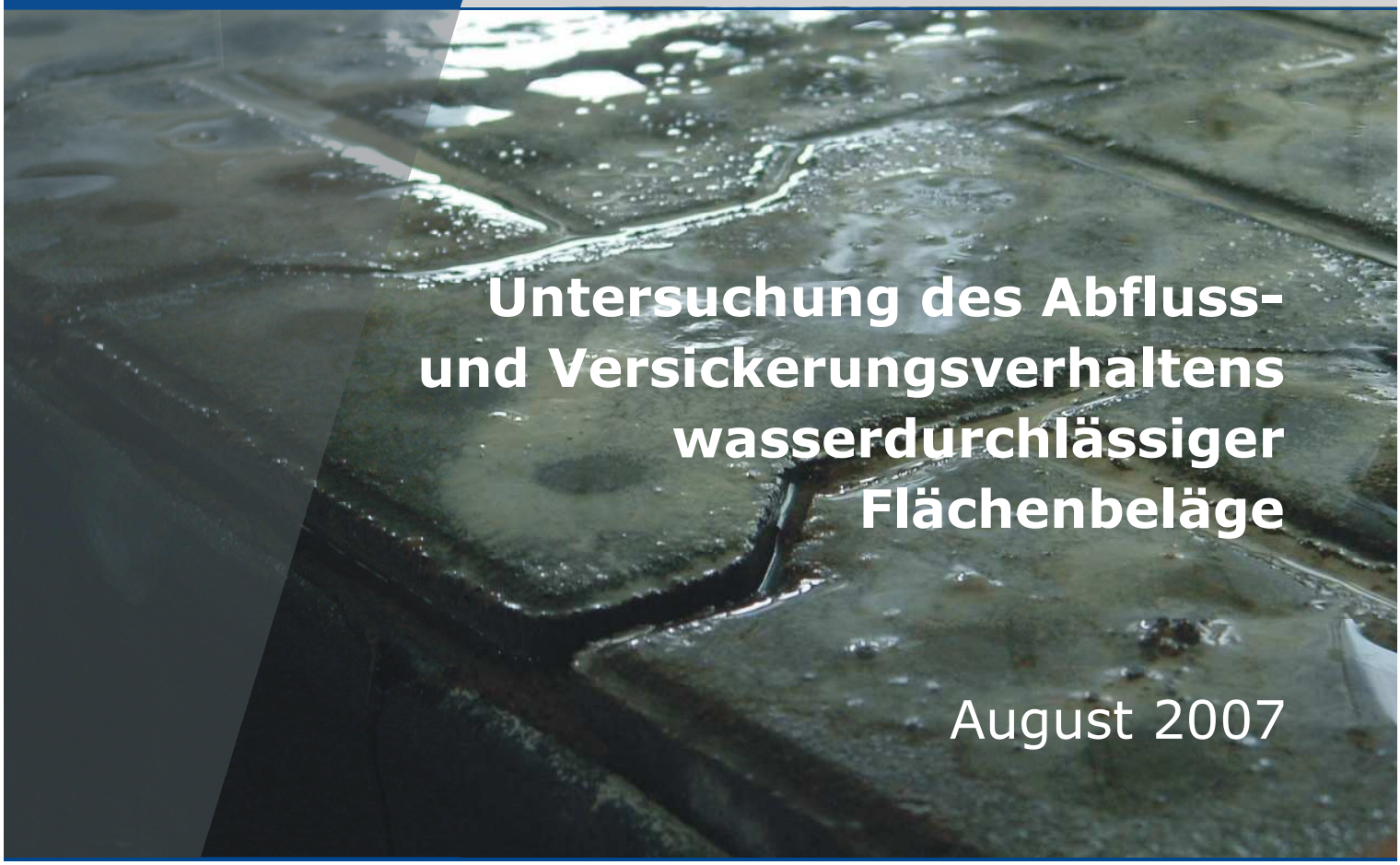
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN

Abschlussbericht



Untersuchung des Abfluss- und Versickerungsverhaltens wasserdurchlässiger Flächenbeläge

August 2007

Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Technische Universität Kaiserslautern

in Kooperation mit

IKT- Institut für Unterirdische Infrastruktur
Gelsenkirchen

SIWAWI

IKT

Projekttitel **Untersuchung des Abfluss- und Versickerungsverhaltens wasserdurchlässiger Flächenbeläge**

Aktenzeichen **IV – 9 – 042 236 0020**

Bearbeitung

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

Paul-Ehrlich-Straße 14
D – 67663 Kaiserslautern

in Kooperation mit

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

Exterbruch 1
D – 45886 Gelsenkirchen

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

Schwannstraße 3
D – 40476 Düsseldorf

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 7

Abbildungsverzeichnis 9

Tabellenverzeichnis 13

1 Einleitung 17

1.1 Hintergrund und Problemstellung 17
1.2 Zielsetzung und Schwerpunkt der Untersuchung 19
1.3 Vorgehensweise 21

2 Grundlagen und Kenntnisstand 25

2.1 Flächenbefestigungen in Siedlungsgebieten 25
2.2 Bodenphysikalische Grundlagen 27
2.2.1 Feststoffmatrix und Porengefüge 27
2.2.2 Wechselwirkungen zwischen Fest- und Flüssigphase 30
2.2.3 Hydraulische Leitfähigkeit der Bodenmatrix 32
2.2.4 Wasserbewegung in einem porösen Medium 35
2.2.5 Infiltrationsvorgang 36
2.3 Erfassung von Abfluss- und Versickerungsprozessen in der Stadthydrologie 40
2.3.1 Abflussbeiwertmethode 40
2.3.2 Modellansätze zur Niederschlags-Abfluss-Simulation wasserdurchlässiger Flächenbeläge 46
2.4 Kenntnisstand zum Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger Pflasterbauweisen 51

3 Material und Methoden 73

3.1 Untersuchungskonzept 73
3.2 Untersuchungsmethodik der Feldmessungen an Bestandsflächen 74
3.3 Untersuchungsmethodik der Laborversuche 76
3.3.1 Versuchsanlage 77
3.3.2 Nachbildung von Kolmationserscheinungen im Labor 80
3.3.3 Untersuchte Flächentypen und Flächeneigenschaften 81

4 Ergebnisse und Diskussion 87

4.1 Infiltrationsversuche an Bestandsflächen 87
4.2 Beregnungsversuche im Labor 98
4.2.1 Fugenarm verlegte Pflasterbeläge aus gefügedichten Betonsteinen 98

4.2.2 Fugenarm verlegte Plattenbeläge 123
4.2.3 Pflasterbeläge mit aufgeweiteten Sickerfugen 133
4.2.4 Poröse Pflasterbeläge aus haufwerksporigen Betonsteinen 138
4.3 Charakterisierung des Versickerungsprozesses anhand der Untersuchungsergebnisse 141
4.4 Mathematische Beschreibung des Versickerungsprozesses auf wasserdurchlässigen Flächenbelägen 145
4.4.1 Konzeption des Berechnungsmodells 145
4.4.2 Infiltrationsmodul 147
4.4.3 Speichermodell 156

5 Anwendungsempfehlungen für die Urbanhydrologie 159

5.1 Abflussbeiwerte zur Dimensionierung entwässerungstechnischer Anlagen 160
5.2 Parameterwerte im Berechnungsansatz nach Horton 168

6 Zusammenfassung und Fazit 175

7 Literatur 179

ANHANG 185

Anhang A-1: Abflussbeiwerte im technischen Regelwerk 185
Anhang A-2: Zahlen- und Parameterwerte zur Modellierung des Oberflächenabflusses 189
Anhang A-3: Messergebnisse zum Versickerungsvermögen aus der Fachliteratur 190
Anhang A-4: Verwendete Messtechnik 198
Anhang A-5: Messerwertdarstellung Infiltrometertest 201
Anhang A-6: Matrizes der durchgeführten Versuchsserien 202
Anhang A-7: Sieblinien der verwendeten Materialgemische 206
Anhang A-8: Messwerte der Versuchsserie 7 an Plattenbelägen unterschiedlichen Formats 207
Anhang A-9: Regressionskurven der Infiltrationsrate in Abhängigkeit von der Beregnungsdauer 208
Anhang A-10: Korrelation der Regressionsparameter 1. Ordnung 210
Anhang A-11: Abminderungsfaktoren im Modellansatz 213
Anhang A-12: Infiltrationsrate in Abhängigkeit der Regenhöhe 214
Anhang A-13: Empfehlung flächenspezifischer Anfangsverlusthöhen 215

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad für verschiedene Böden und Mineralstoffgemische 31

Abbildung 2: Beziehung zwischen Wasserleitfähigkeit und Saugspannung bei einem gesiebten Sand mit Körnung 0/2 mm im Be- und Entwässerungsfall (Hysterese) 32

Abbildung 3: Wasserleitfähigkeit am Beispiel dreier verschiedener Bodenmatrices in Abhängigkeit von der Wasserspannung 33

Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Versickerungsrate 37

Abbildung 5: Wassergehaltsprofil einer Infiltrationsfront bei Überstau 39

Abbildung 6: Gegenüberstellung empfohlener Abflussbeiwerte für verschiedene wasserdurchlässige Flächenbefestigungen 45

Abbildung 7: Modellparameter nach Anpassung an Abflussbeiwerte und gemessene Infiltrationsverläufe für fugenarmes Normalpflaster40 50

Abbildung 8: Modellparameter nach Anpassung an Abflussbeiwerte und gemessene Infiltrationsverläufe für Sickerfugenpflaster40 50

Abbildung 9: Anteile des Oberflächenabflusses, der Infiltration, Evaporation und Perkolation an der Jahresniederschlagshöhe für verschiedene Flächenbefestigungen 54

Abbildung 10: Messwerte von Borgwardt an neuen und alten Pflasterflächen und daraus abgeleitete Regressionskurven der Infiltrationsrate 57

Abbildung 11: Bandbreite der von Borgwardt gemessenen Anfangs- und Endinfiltrationsraten für verschieden Belagstypen 58

Abbildung 12: Anfangs- und Endinfiltrationsraten für alte Pflasterflächen mit engen und mit weiten Fugen 59

Abbildung 13: Spitzenabflussbeiwerte für verschiedene Flächenbefestigungen für eine 15-minütige Beregnung nach Borgwardt 60

Abbildung 14: Mittlere Infiltrationsraten in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität für vier verschiedene Pflasterbauweisen 65

Abbildung 15: Bandbreite der von Nolting et al. gemessenen Versickerungsraten für verschiedene Sickerfugenbeläge und Pflasterflächen aus haufwerksporigen Betonsteinen 68

Abbildung 16: Schematische Darstellung der Lysimeteranlage 78

Abbildung 17: Untersuchungsflächen am Standort Lingen 87

Abbildung 18: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an fugenarmem Standardpflaster aus gefügedichten Betonsteinen 88

Abbildung 19: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an Sickerfugenpflaster aus gefügedichten Betonsteinen mit 10 mm breiten, splittverfüllten Fugen 89

Abbildung 20: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an fugenarmem Porenbetonpflaster sowie an Sickerfugenpflaster mit speziell ausgebildeten Ableitungsrinnen 90

Abbildung 21: Anfangs- und Endinfiltrationsraten der vier am Standort Lingen untersuchten Pflastertypen 91
Abbildung 22: Untersuchungsflächen am Standort Gelsenkirchen..... 93
Abbildung 23: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an Sickerfugenpflaster mit splittgefüllten Sickerkammern 93
Abbildung 24: Gegenüberstellung der Versickerungsleistungen der untersuchten Sickerfugenbeläge 95
Abbildung 25: Untersuchungsflächen am Standort Kevelaer (Busparkplatz)..... 95
Abbildung 26: Untersuchungsflächen am Standort Straelen (Schulhof) 96
Abbildung 27: Bandbreite der in Straelen und Kevelaer gemessenen Versickerungsraten an Pflasterbelägen aus haufwerksporigen Betonsteinen 97
Abbildung 28: Flächenbeläge aus fugenarmem Doppelverbund- und Rechteckpflaster..... 99
Abbildung 29: Schemaskizze des Pflasteraufbaus 99
Abbildung 30: Messwertdarstellung für einen Beregnungsversuch an Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle (400 g/m² Quarzmehl, r = 100 l/(s·ha)) 101
Abbildung 31: Messwertdarstellung für einen Beregnungsversuch an Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle (200 g/m² Quarzmehl, r = 200 l/(s·ha)) 103
Abbildung 32: Matrix der an fugenarmem Doppelverbundpflaster durchgeführten Beregnungsversuche.....104
Abbildung 33: Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei mäßigem sowie bei ausgeprägtem Kolmationsgrad in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität (2,5% Gefälle) 105
Abbildung 34: Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters in Abhängigkeit von Beregnungsintensität, Kolmationsgrad und Gefälle (D = 15 min) 107
Abbildung 35: Messwertdarstellung für einen Laborversuch mit intensitätsvariabler Beregnung an einem Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle und ausgeprägtem Kolmationsgrad 108
Abbildung 36: Messergebnisse der Versickerungsrate und des Wassergehaltes bei intermittierender Beregnung an einem Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle bei ausgeprägter Kolmation (400 g/m² Quarzmehl).....112
Abbildung 37: Versickerungsraten in Abhängigkeit von der vorangegangenen Trockenperiode bei unterschiedlichen Kolmationsgraden (fugenarmes Doppelverbundpflaster).....114
Abbildung 38: Zusammenhang zwischen der Versickerungsrate und dem Wassergehalt in den oberen Tragschichthorizonten bei einem Doppelverbundpflasterbelag mit ausgeprägtem Kolmationsgrad 115
Abbildung 39: Zusammenhang zwischen der Versickerungsrate und dem Wassergehalt in den oberen Tragschichthorizonten bei einem Doppelverbundpflasterbelag mit mäßigem Kolmationsgrad 115
Abbildung 40: Korrelationen zwischen Infiltrationsrate und Wassergehalt in der Tragschicht für einen Doppelverbundpflasterbelag 117
Abbildung 41: Abflussbeiwerte eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei 2,5% Gefälle und ausgeprägtem Kolmationsgrad für verschiedene Dauerstufen.....118
Abbildung 42: Abflussbeiwerte eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei 2,5% Gefälle und mäßigem Kolmationsgrad für verschiedene Dauerstufen.....118
Abbildung 43: Gegenüberstellung der Infiltrationsraten von Doppelverbund- und Rechteckpflaster für verschiedene Beregnungsintensitäten, Kolmationsgraden und Dauerstufen (Gefälle 2,5%) 119

Abbildung 44: 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% 121
Abbildung 45: Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten 123
Abbildung 46: Aufbau der untersuchten Plattenbeläge (Schemaskizze) 124
Abbildung 47: Infiltrationsverläufe der untersuchten Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten im Neuzustand (Gefälle 2,5%) 125
Abbildung 48: Infiltrationsverläufe der untersuchten Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten im Gebrauchszustand (Gefälle 2,5%) 125
Abbildung 49: Versickerungsraten fugenarmer Plattenbeläge in Abhängigkeit vom Fugenanteil (D = 30 min) 127
Abbildung 50: Versickerungsraten fugenarmer Plattenbeläge in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität 127
Abbildung 51: Messergebnisse an Plattenbelägen mit einem Fugenanteil von 1,8% 129
Abbildung 52: Abflussbeiwerte eines Plattenbelages mit einem Fugenanteil von 1,8% bei einem Gefälle von 2,5% in Abhängigkeit von Beregnungsintensität und Kolmationsgrad 132
Abbildung 53: Abflussbeiwerte eines Plattenbelages mit einem Fugenanteil von 0,6% bei einem Gefälle von 2,5% in Abhängigkeit von Beregnungsintensität und Kolmationsgrad 132
Abbildung 54: Flächenbeläge aus Betonsteinen mit splittverfüllten Sickerfugen 134
Abbildung 55: 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) 135
Abbildung 56: Sickerabflussraten eines Pflasterbelages mit splittverfüllter Sickerfuge von 10 mm Breite bei unterschiedlichen Quarzmehlmengen (Beregnungsintensität 300 l/(s·ha) 136
Abbildung 57: Messergebnisse eines Pflasterbelages mit splittverfüllter Sickerfuge von 7 mm Breite in singulärer Anordnung ohne Tragschicht (1000 g/m² Quarzmehl, 2,5% Gefälle) 138
Abbildung 58: Flächenbeläge aus porösen Betonsteinen 139
Abbildung 59: Schema des bi-direktionalen Schichtenmodells 146
Abbildung 60: Korrelation zwischen Infiltrationsrate und Niederschlagsintensität am Beispiel eines fugenarmen Verbundpflasters mit 2,5% Gefälle für die Dauerstufe D = 20 min 147
Abbildung 61: Korrelation zwischen Infiltrationsrate und Niederschlagsintensität am Beispiel eines fugenarmen Verbundpflasters mit 2,5% Gefälle für verschiedene Dauerstufen zwischen 5 min und 60 min 148
Abbildung 62: Parameterwerte A zur Regression der Infiltrationsrate 149
Abbildung 63: Parameterwerte B zur Regression der Infiltrationsrate 149
Abbildung 64: Parameterwerte fmax zur Regression der Infiltrationsrate 149
Abbildung 65: Korrelation der Parameterwerte A, B und fmax 151
Abbildung 66: Gegenüberstellung gemessener und errechneter Infiltrationsraten für einen Plattenbelag mit einem Fugenanteil von 1,8% bei einer Regendauer von D = 30 min 154
Abbildung 67: Infiltrationsrate in Abhängigkeit der kumulativen Niederschlagshöhe und der Regendauer am Beispiel eines fugenarmen Pflasterbelages mit ausgeprägter Kolmation 155

Abbildung 68: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenarm verlegte Plattenbeläge (Fugenanteil ≤ 3%).....162
Abbildung 69: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenarm verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 3%-6%).....163
Abbildung 70: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenreich verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 6%-12%).....164
Abbildung 71: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für Pflasterbeläge mit splittgefüllten Fugen oder Kammern (Fugenanteil 6%-12%).....165
Abbildung 72: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für poröse Pflasterbeläge aus haufwerksporigen Betonsteinen.....166
Abbildung 73: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für Flächenbefestigungen aus Rasengitter und Schotterrasen.....167
Abbildung 74: Verlauf der Infiltrationsrate im Ansatz nach Horten für verschiedene Abnahmekoeffizienten.....171
Abbildung 75: Verlauf der Infiltrationsrate im Ansatz nach Horten für verschiedene Regenerationskoeffizienten.....172

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gängige Arten wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen 26

Tabelle 2: Beziehung zwischen Porengrößen und Matrixpotenzial sowie daraus abgeleitete Wasserbindungsformen 29

Tabelle 3: Empfohlene Abflussbeiwerte für unterschiedliche Flächenbefestigungen 43

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

Tabelle 5: Parameterwerte zur Abflussbildung nach Schmitt und Illgen (2001) 49

Tabelle 6: Endversickerungsraten für verschiedene naturnahe Flächenbefestigungen nach Dellwig 55

Tabelle 7: Bandbreite des in der Fachliteratur angegebenen Versickerungsvermögens wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen im Gebrauchszustand 72

Tabelle 8: Übersicht der Untersuchungsflächen der Infiltrometermessungen 75

Tabelle 9: Übersicht der Versuchsserien am Lysimeter 82

Tabelle 10: Zahlenwerte der Regressionsparameter zweiter Ordnung für einen fugenarmen Pflasterbelag (fugenarmes Verbundpflaster, 2,5% Gefälle) 150

Tabelle 11: Zahlenwerte der Modellparameter des Infiltrationsmodells für einen fugenarmen Pflasterbelag für verschiedene Kolmationsgrade 152

Tabelle 12: Abminderungsfaktoren ζ_J der Infiltrationsrate in Abhängigkeit vom Oberflächengefälle 153

Tabelle 13: Empfohlener Wertebereich der Anfangsversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei deutlicher Kolmation 169

Tabelle 14: Empfohlener Wertebereich der Anfangsversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei mäßiger Kolmation 169

Tabelle 15: Empfohlener Wertebereich der Endversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei deutlicher Kolmation 170

Tabelle 16: Empfohlener Wertebereich der Endversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei mäßiger Kolmation 170

Tabellen im Anhang

Tabelle A - 1: Abflussbeiwerte nach ATV-DVWK-M 153 (2000) zur Anwendung nach DWA-A 138 und ATV-DVWK-M 153 185

Tabelle A - 2: Abflussbeiwerte ψ_{A128} nach ATV-DVWK-M 177 (2001) zur Ermittlung der Rechengröße $A_{u,A128}$ nach ATV-Arbeitsblatt A 128 186

Tabelle A - 3: Abflussbeiwerte nach DIN EN 752-4 (1997) 186

Tabelle A - 4: Abflussbeiwerte nach DIN 1986-100 (2007) 187

Tabelle A - 5: Empfohlene Spitzenabflussbeiwerte nach DWA-Arbeitsblatt A 118 (2006) in Abhängigkeit vom Befestigungsgrad γ 188

Tabelle A - 6: Monatsspezifische Reduzierungsfaktoren der Benetzungsverlusthöhen und Monatswerte der mittleren täglichen Verdunstungsraten 189

Tabelle A - 7: Abfluss- und Versickerungskennwerte für verschieden Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow für neue Flächenbefestigungen 191

Tabelle A - 8: Abfluss- und Versickerungskennwerte für verschieden Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow für gealterte Flächenbefestigungen 192

Tabelle A - 9: Abfluss- und Versickerungskennwerte für verschieden Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow für wassergebundene Decken 193

Tabelle A - 10: Vorschlag zur Höhe von Abminderungsfaktoren ζ_{TP} zur Berücksichtigung der Vorgeschichte eines Regenereignisses 213

Tabelle A - 11: Anfangsverlusthöhen durchlässig befestigter Flächentypen 215

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.

Im Rahmen nachhaltiger Entwässerungskonzepte werden darüber hinaus vielfach versickerungsaktive Flächenbeläge eingesetzt, 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, 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 zunehmenden Anteil an 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 bedingt 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 wasserdurchlässige 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 Berechnungsansätze wurden aus Mangel an Alternativen bereits vor Jahrzehnten aus der Ge-

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

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

3 ebenda

wässerhydrologie übernommen und auf versickerungsfähige Flächen in städtischen Einzugsgebieten übertragen; seither aber nicht nennenswert verbessert. Das im Vergleich zu natürlichen Böden differierende Abfluss- und Versickerungsverhalten technischer Flächenbefestigungen vermögen diese Ansätze nur in begrenztem 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 wurden die Untersuchungen vielfach an Flächenbelägen im Neuzustand durchgeführt. Der sukzessive Eintrag von Feinpartikeln, auch als Kolmation bezeichnet, der zu einer beträchtlichen Abnahme des Versickerungsvermögens mit zunehmender Standzeit führen kann, blieb oftmals unberücksichtigt. Insgesamt ist damit ein erheblicher Kenntnismangel zum tatsächlichen Abfluss- und Versickerungsverhalten wasserdurchlässiger Siedlungsflächen zu konstatieren, insbesondere zum Versickerungsvermögen von gering bis mäßig durchlässigen Pflaster- und Plattenbelägen.

1.2 Zielsetzung und Schwerpunkt der Untersuchung

Fundamentale Voraussetzungen für eine sachlich zutreffende und finanziell ausgewogene Planung von Entwässerungssystemen oder einzelner Entwässerungsanlagen sind zuverlässige Berechnungsgrundlagen sowie zutreffende Berech-

nungsmethoden. Diese sind jedoch im Hinblick auf die Quantifizierung des Oberflächenabflusses sowie der Versickerungsleistung wasserdurchlässiger Siedlungsflächen derzeit nicht in ausreichendem Maße gegeben, was zu enormen Ungenauigkeiten und Unsicherheiten führen kann.

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

Damit lassen sich die primären Ziele des vorliegenden Forschungsprojektes wie folgt benennen:

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

Das Forschungsprojekt 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 soll im Rahmen des Forschungsprojektes auf phänomenologischer Ebene untersucht werden. Der prinzipielle Infiltrationsvorgang soll analysiert und beschrieben, Einflussfaktoren identifiziert und ihre Auswirkungen auf den Versickerungsprozess quantifiziert werden. Besonderes Augenmerk wird hierbei darauf gelegt, repräsentative und aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Dies umfasst sowohl die Betrachtung eines breiten Spektrums an Flächentypen als auch die Analyse der wesentlichen Einflussgrößen wie beispielsweise Oberflächengefälle, Kolmationsgrad, Niederschlagsbelastung und Flächenkonstruktion. Die Untersuchung erstreckt sich daher prinzipiell auf die gesamte Bandbreite wasserdurchlässiger 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.

Auf der Basis der erzielten Untersuchungsergebnisse sollen schließlich flächenspezifische Bemessungskennwerte abgeleitet und eine verbesserte Methodik zur Oberflächenabflussberechnung entwickelt werden. 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 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

In einem ersten Schritt werden die Ergebnisse in der Fachliteratur dokumentierter Untersuchungen zusammengetragen, aufbereitet und ausgewertet. 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 weiter gehende Untersuchung sowie die Bewertung der Ergebnisse dar.

Der Kenntnisstand zum Abflussbildungsprozess auf wasserdurchlässigen Flächenbelägen kann dagegen nur durch systematische messtechnische Untersuchungen substanziell verbessert werden. Der gewählte Forschungsansatz sieht deshalb ein umfangreiches Messprogramm vor, 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 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 bzw. in das Gefüge poröser Deckbeläge (Kolmation) oder sukzessive Nachverdichtung des Oberbaus. Darüber hinaus dienen die Ergebnisse der in-situ-

Messungen zusammen mit den Angaben in der Literatur 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 insgesamt sechs unterschiedliche Belagstypen mit Hilfe eines Tropfinfiltrometers untersucht. Hierbei wurde jeder Belag mehrfach und an mehreren Stellen in der Örtlichkeit beprobt.

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 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. 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.

Da es nicht möglich ist, Pflasterbeläge nach mehrjähriger Standzeit auszubauen und anschließend im Versuchsstand zu untersuchen, ohne das Pflastergefüge samt Fugenfüllung zu beschädigen, wurde der Eintrag von Feinpartikeln in die Fugen, wie er sich bei Flächen in situ über die Jahre zweifelsfrei vollzieht, im Labor durch Auftragen und Einspülen von Quarzmehl nachgebildet. Hierbei dienen die Ergebnisse der durchgeführten Infiltrometermessungen an den baugleichen Flächenbelägen als Orientierungswerte bei der Zuordnung der verwendeten Quarzmehlmengen zu verschiedenen Kolmatierungsgraden. Auf diese Weise ist es möglich, den Vorteil von Laboruntersuchungen mit klar definierten und reproduzierbaren Versuchsbedingungen mit realen Nutzungsbedingungen nach mehrjähriger Standzeit zu verknüpfen.

Die messtechnischen Untersuchungen umfassen zahlreiche Pflaster- und Plattenbeläge mit unterschiedlich hohem Versickerungsvermögen. Analysiert wurden im Rahmen des Untersuchungsprogramms die folgenden Belagstypen:

- versickerungsschwache Plattenbeläge mit geringen Fugenweiten von 3-4 mm (Fugenanteile 0,6%, 1,2% und 1,8%)
- gering bis mäßig durchlässige Rechteck- und Verbundpflasterbeläge mit geringen Fugenweiten von 3-4 mm (Fugenanteile 4-5%)
- moderat durchlässiges Rechteckpflaster mit größeren Fugenweiten von 7 mm und 10 mm (Fugenanteile 10-14%)
- versickerungsstarke Pflasterbeläge aus Sickerfugensteinen mit speziellen Kammern oder Rinnen (Fugenanteile 4-10%)
- besonders durchlässige Pflasterbeläge aus wasserdurchlässigem Porenbeton mit geringen sowie mit großen Fugenweiten von 3-25 mm.

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

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 beträgt[4]. 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 Materialen 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 i.d.R. nur bei Flächenbefestigungen, bei denen die vollständige Oberfläche versickerungsfähig ausgebildet ist, von porösen Flächenbefestigungen.

---

[4] Statistisches Bundesamt (2006); S. 387ff.

Anmerkung: Der Anteil der Verkehrsflächen an den Siedlungsflächen beträgt derzeit rd. 38%. Die Siedlungsflächen beinhalten hierbei auch unbefestigte Freiflächen.

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

Tabelle 1: Gängige Arten wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen

Flächentyp	Abflusswirksamkeit
Plattenbelag aus Beton- oder Natursteinplatten	hoch
Pflasterbelag aus Beton- oder Natursteinen	mittel bis hoch
wassergebundene Decke	mittel bis hoch
Sickerfugenpflaster mit Kammern, Schlitzen oder ähnlichen Sickeröffnungen[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 die überbauten Flächen machen in Deutschland Pflasterbauweisen den weitaus größten Anteil an wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen aus. Pflasterungen aus Beton, erstmals Ende des 19. Jahrhunderts eingesetzt, dominieren heute und besitzen seit Jahrzehnten die weitaus größte Marktbedeutung aller bekannten Produkte zur Herstellung von Pflasterdecken. Das hauptsächliche Einsatzgebiet von Pflasterbauweisen aus Naturstein, Klinker und Beton sind Außenbereichsflächen im kommunalen, industriellen und privaten Gebäudeumfeld.[6] Pflasterbauweisen einschließlich Plattenbelägen haben dort einen Flächen-

[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] Ulonska, D. (2005); S. 4

anteil von rd. 70%, wovon rd. 90% unter Verwendung von Betonprodukten ausgeführt werden[7].

Pflastersysteme, die eine gezielte Versickerung von Regenwasser ermöglichen sollen, werden seit Ende der 1960er, Anfang der 1970er Jahre entwickelt[8]. 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 gering[9]. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, insbesondere das Versickerungsvermögen herkömmlicher Pflasterbauweisen mit geringem Fugenanteil und entsprechend limitiertem Versickerungsvermögen eingehend zu untersuchen.

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 oder künstlich hergestellte haufwerkporige Elemente aus Beton, Kunststoff oder Asphalt sein. 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

---

7 SLG (2004)

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

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

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.[10]

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.[11]

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.[12]

Die Porengrößenverteilung stellt, wie auch die Körnung, ein Kontinuum dar, das in konventionell festgelegte Bereiche unterteilt wird.[13] Mit den Grenzen dieser Porengrößenbereiche sind die in Tabelle 2 aufgeführten Kennwerte des Wasserhaushaltes im Boden verbunden.

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 Poren bewegt sich das Wasser vergleichsweise leicht und dränt unter dem Ein-

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

11 Flühler, H. und Roth, K. (2003)

12 Kellermann, C. (2003)

13 Flühler, H. und Roth, K. (2003)

fluss 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 (∅ 0,2 - 10 µm) gebundene Wasser kann durch Wurzeln der Bodenmatrix entzogen werden. Feinporen (∅ < 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.

Tabelle 2: Beziehung zwischen Porengrößen und Matrixpotenzial sowie daraus abgeleitete Wasserbindungsformen[14]

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

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 dominieren[15]. Entsprechend ist der Anteil kapillar gebundenen Wassers bei diesen Materialen sehr gering; ein kapillarer Aufstieg findet i.d.R. nicht statt.

[14] nach Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1994); S. 296.

[15] Fach, S. (2006); S. 146

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 i.d.R. 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 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 1 sind typische Saugspannungsverläufe von Sand-, Schluff- und Tonböden den Verläufen verschiedener mineralischer Baustoffgemische gegenübergestellt[16].

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

Die Abbildung verdeutlich 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

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

adsorbierenden Oberfläche und einer Abnahme des Porendurchmessers bei zunehmendem Anteil an Feinkorn bzw. Feinporen[17].

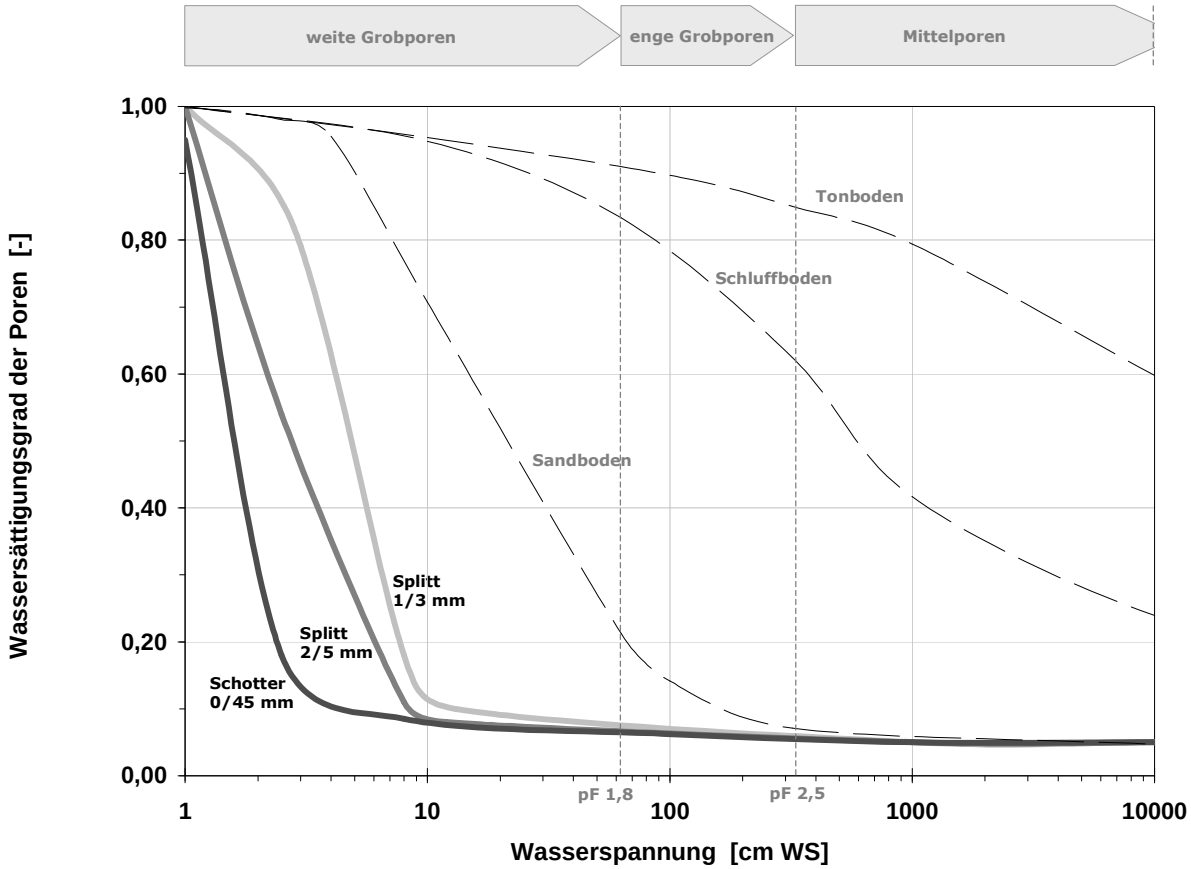


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad für verschiedene Böden und Mineralstoffgemische

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 Wassergehaltsänderung[18]. 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.

Dieser als Hysterese bezeichneter Effekt resultiert in erster Linie aus der bei Be- und Entwässerung gegensätzlichen Wirkung von Porenengpässen und Luftinklu-

[17] 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.

[18] Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992)

sionen. 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 im Lehm kein signifikanter Effekt festgestellt werden kann. In Abbildung 2 ist der Hystereseeffekt am Beispiel der Wasserleitfähigkeits-Kurve eines gesiebten Sandes, wie er als Bettungs- und Fugenmaterial von Pflasterflächen häufig Anwendung findet, dargestellt.

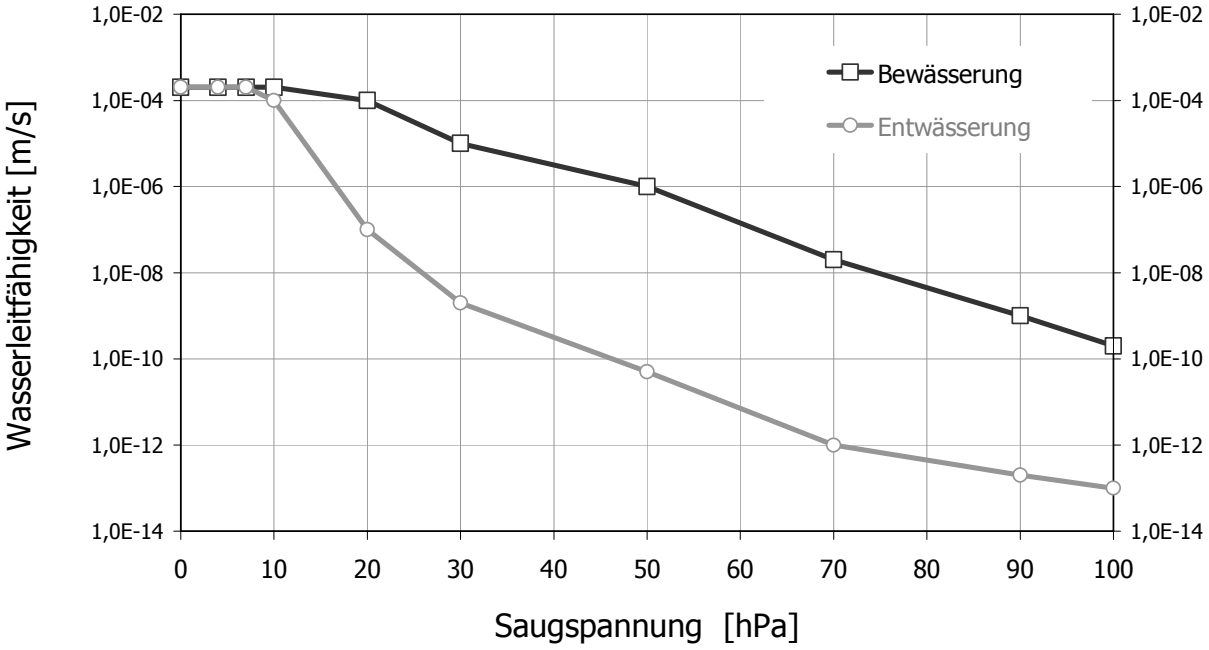


Abbildung 2: Beziehung zwischen Wasserleitfähigkeit und Saugspannung bei einem gesiebten Sand mit Körnung 0/2 mm im Be- und Entwässerungsfall (Hysterese)[19]

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

[19] nach Flöter, O. (2006); S. 123

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, i.d.R. 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 3 veranschaulicht.

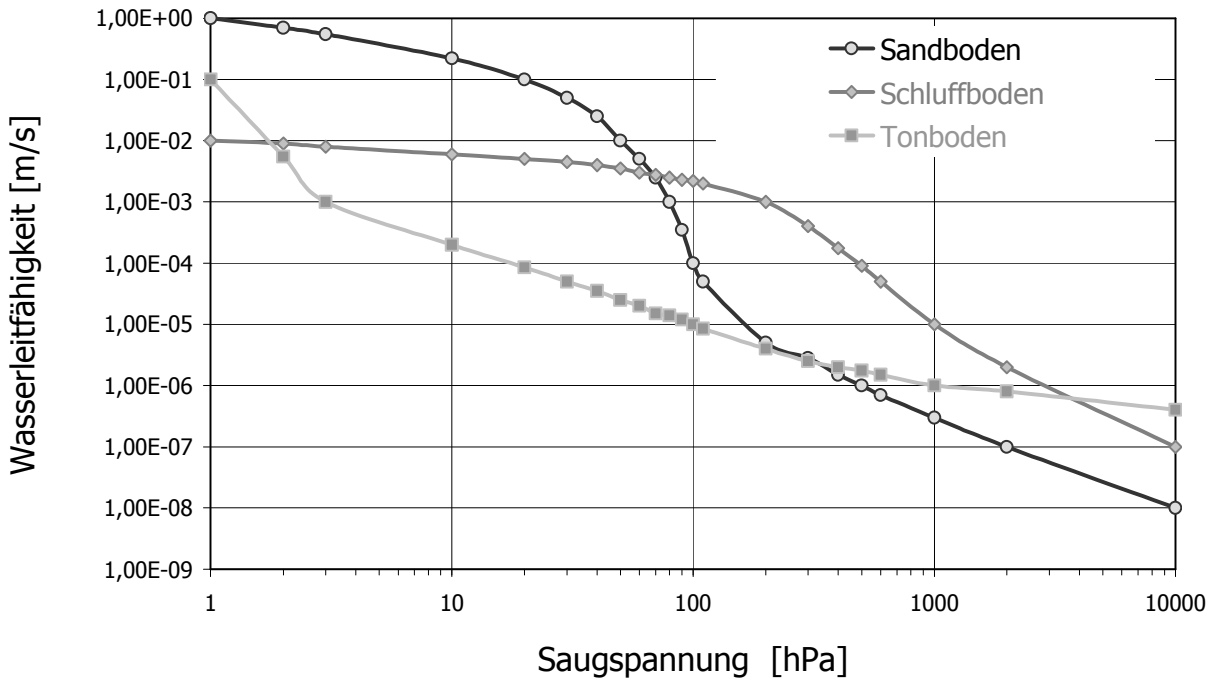


Abbildung 3: Wasserleitfähigkeit am Beispiel dreier verschiedener Bodenmatrices in Abhängigkeit von der Wasserspannung[20]

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

[20] nach Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992)

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 Tonbodens größer als die aller anderen Böden, weil er in diesem Zustand wegen des noch relativ hohen Wassergehaltes die größten Fließquerschnitte hat. Dieses Beispiel verdeutlich 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 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 2).[21] 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.

[21] nach Flöter, O. (2006); S. 117 ff.

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
ψ: antreibendes Potenzial; hier das hydraulische Potenzial ψ_H
z: Fließstrecke

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):

$$\frac{\delta \Theta}{\delta t} = -\frac{\delta q}{\delta z}$$

mit θ: Wassergehalt
t: Zeit

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:

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

mit $\delta\theta/\delta t$: zeitliche Änderung des Wassergehaltes
$k(\psi_m)$: hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial
$\delta\psi_m/\delta z$: 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.[22] 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

[22] Kellermann, C. (2003) und Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992)

der Wasserleitfähigkeit bei wechselndem Wassergehalt, das Porenvolumen sowie der Wassergehalt zu Beginn des Versickerungsprozesses.[23]

Bei langanhaltenden Infiltrationsversuchen ergibt sich typischerweise der nachstehend schematisierte Verlauf (Abbildung 4).

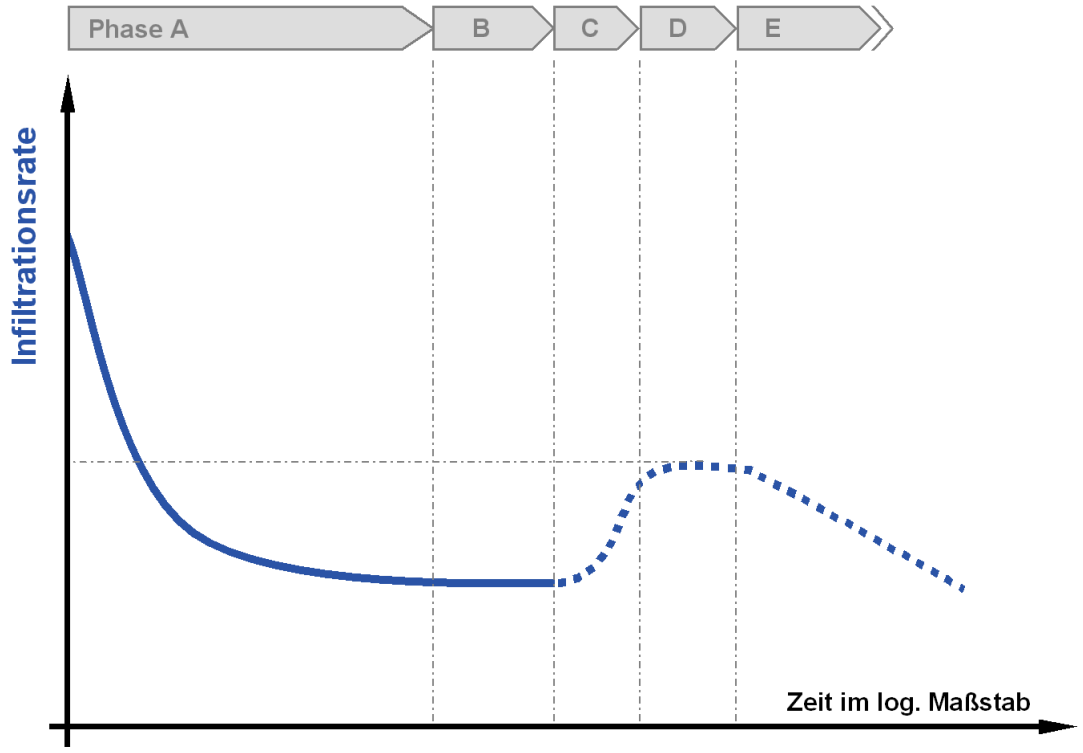


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Versickerungsrate[24]

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 mikro-

[23] Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992)

[24] nach Jonasson, S. A. (1984)

biellen 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.

Der in Abbildung 4 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.[25] 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.[26] 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 charakteristischen Verlauf auf, der in Abbildung 5 für einen homogen Boden schematisch dargestellt ist.[27]

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.

---

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

26 Flöter, O. (2006); S. 135 ff

27 nach Kölbl, A. (2006)

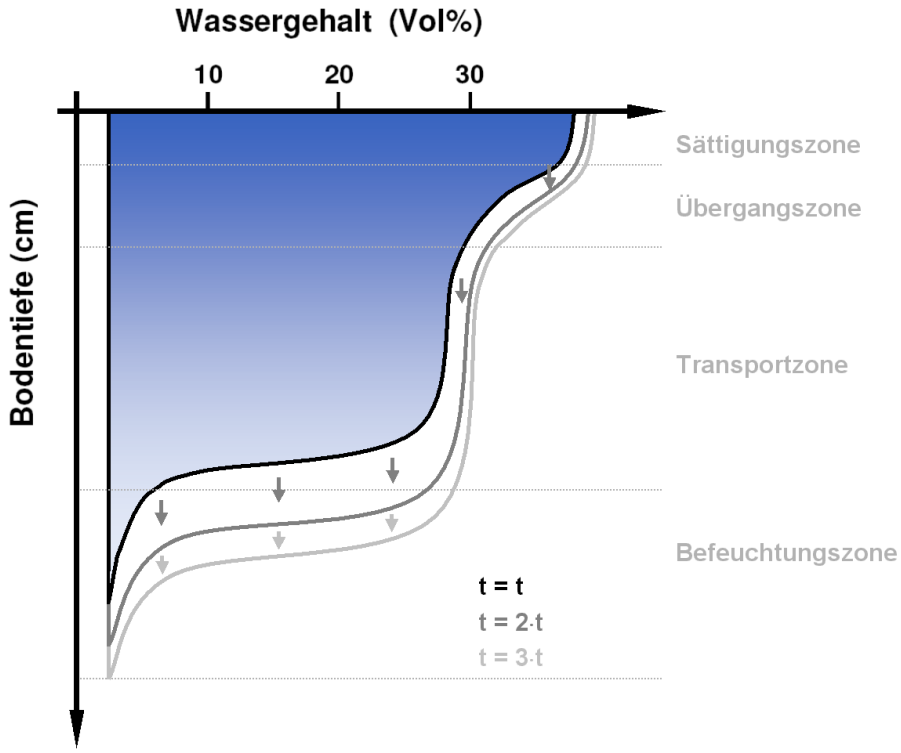


Abbildung 5: Wassergehaltsprofil einer Infiltrationsfront bei Überstau

Es wird davon ausgegangen, dass sich im Baukörper von wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen ein ähnliches Tiefenprofil beim Infiltrationsvorgang bildet, 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 verwiesen[28].

[28] 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, i.d.R. 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 ψ_S oder mittlere Abflussbeiwerte ψ_m Anwendung, die jeweils in Bezug zu einer bestimmten Niederschlagsbelastung gesehen werden müssen.[29]

[29] 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.[30]

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:

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

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. Die Abflussbeiwerte weisen folglich in ihrer Größe entsprechende Unterschiede auf.

[30] 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. Die diesbezüglichen Ausführungen des ATV-DVWK-Arbeitsblattes A 198 (2003) sollten beachten werden.

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:

$$\psi_S = \frac{\text{max.Regenabflussspende}}{\text{zugehörige Regenspende}} = \frac{q_{max}}{r}$$

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 $\psi_{A128.}$ 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.

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. Eine Differenzierung nach jeweiligem Flächentyp wird hier nicht getrof-

fen. Die DIN EN 752-4 (1997) empfiehlt pauschal für „Durchlässige Flächen" einen Spitzenabflussbeiwert von „0 bis 0,3, je nach Geländeneigung und Oberflächenbeschaffenheit".[31] Eine ähnlich detaillierte Differenzierung nach Flächenarten und -beschaffenheit wie in der DIN 1986-100 oder im Merkblatt M 153 findet sich hier nicht.

Tabelle 3: Empfohlene Abflussbeiwerte für unterschiedliche Flächenbefestigungen

Flächencharakterisierung nach ATV-DVWK-M 153		**ATV-DVWK M 153**	**ATV-DVWK M 177**	**DIN 1986-100*)**
Flächentyp	**Art der Befestigung**	**ψ_{M153}**	**ψ_{A128}**	**ψ_s**
Schrägdach	Metall, Glas, Schiefer, Faserzement	0,9 – 1,0	1,0	1,0
	Ziegel, Dachpappe	0,8 – 1,0	1,0	1,0
Flachdach (Neigung bis 3° oder ca. 5 %)	Metall, Glas, Faserzement	0,9 – 1,0	1,0	1,0
	Dachpappe	0,9	1,0	—
	Kies	0,7	0,9	0,5
Gründach (Neigung bis 15° oder ca. 25 %)	humusiert < 10 cm Aufbau	0,5	0,8	0,5
	humusiert ≥ 10 cm Aufbau	0,3	0,6	0,3
Straßen, Wege und Plätze (flach)	Asphalt, fugenloser Beton	0,9	1,0	1,0
	Pflaster mit dichten Fugen	0,75	0,9	0,7
	fester Kiesbelag	0,6	0,8	0,5 *)
	Pflaster mit offenen Fugen	0,5	0,7	0,7
	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, Bankette und Gräben	toniger Boden	0,5	—	—
	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	—	—

*) 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.

Somit stehen zwar für verschiedene wasserdurchlässige Flächenbeläge Abflussbeiwerte für unterschiedliche Bemessungsaufgaben zur Verfügung, allerdings

[31] siehe Tabelle A - 3

wäre eine weitergehende Differenzierung nach Flächenarten wünschenswert, die das Spektrum der auf dem Markt erhältlichen Flächentypen besser wiederspiegelt. 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 Gegenüberstellung der in den unterschiedlichen Regelwerken ausgewiesenen Abflussbeiwerte für durchlässige Flächenbefestigungen zeigt Abbildung 6.

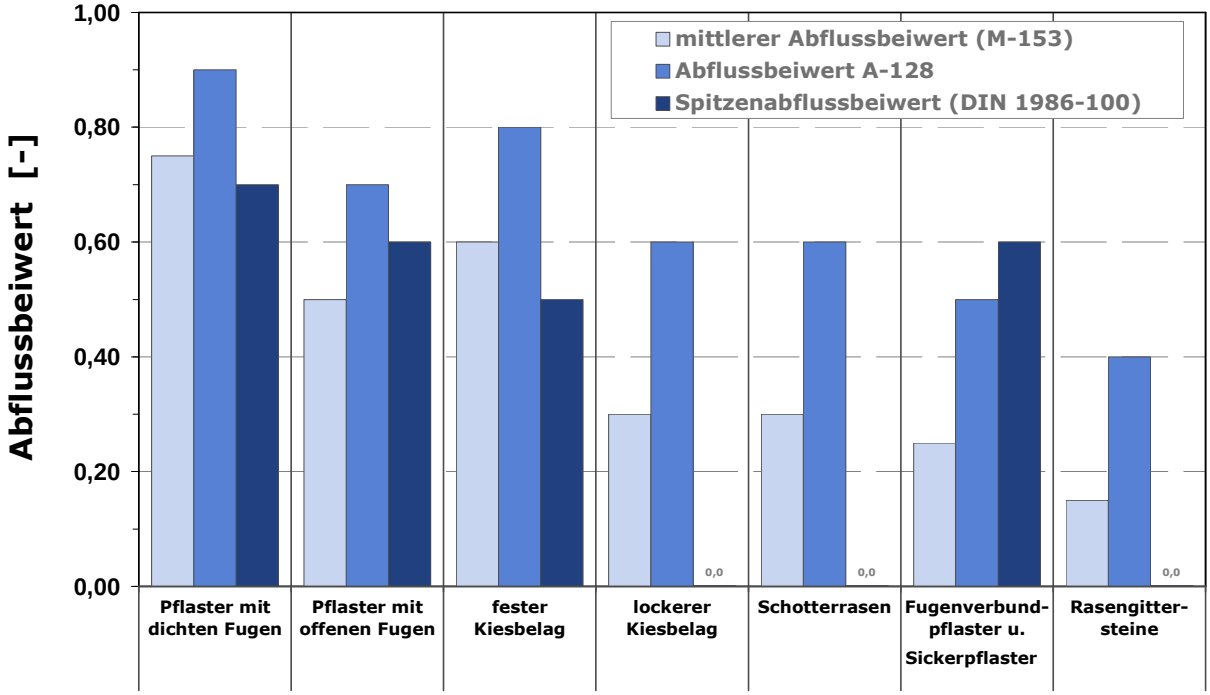


Abbildung 6: **Gegenüberstellung empfohlener Abflussbeiwerte für verschiedene wasserdurchlässige Flächenbefestigungen**

Die Darstellung veranschaulicht, dass zwischen den unterschiedlichen Regelwerken z.T. deutliche Inkonsistenzen bzgl. der empfohlenen Zahlenwerten 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 Abflussbeiwerten ψ_{M153} und ψ_{A128} andererseits) .

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 sämtliche in Abbildung 6 aufgeführten Flächenkategorien.

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 Flächenbeläge

Die Simulation des Oberflächenabflusses unterteilt sich i.d.R. 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 Benetzungs- und Muldenverluste auf, die als pauschale Verlustwerte oder zeitlich gestaffelt nach verschiedenen Berechnungsmethoden abgebildet werden.[32] Bei durchlässig 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.[33]

Die zu Beginn eines Niederschlages erfolgende Befeuchtung der Oberfläche eines Flächenbelages wird i.d.R. 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.[34] 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 Interzeptions-

---

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

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

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

sowie der Retentionskapazität der Flächenbefestigungen statt. Dieser Prozess wird i.d.R. 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.

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).[35]

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:

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

f(t): Infiltrationsrate in [l/(s·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.

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

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

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

Δt: Intervalllänge

[35] siehe bspw. Verworn, H.-R. (1999)

$$f_i = f_0 - (f_0 - f_{i-1}) \cdot e^{-kD \cdot \Delta t} \qquad (H3)$$

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

k_D: Regenerationskonstante während Trockenphasen in [1/min]

Der Ansatz von Horton wurde für natürliche Gewässereinzugsgebiete und somit für weitgehend natürliche Böden entwickelt und auf versickerungsfähige Flächen in städtischen Einzugsgebieten[36] 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.

Tabelle 4: Bodenarten und Parameter für den erweiterten Ansatz nach Horten /Paulsen[37]

Modellparameter		Bodenart			
		Sand/Kies	Feinsand/ lehm. 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

Die in der Literatur genannten Parameterwerte[38] beziehen sich vorwiegend auf die pauschale Betrachtung unbefestigter Flächen innerhalb eines Einzugsgebietes und erstrecken sich über einen weiten Wertebereich.[39] Folgende Wertebereiche werden hierbei für die einzelnen zuvor genannten Versickerungsparameter angegeben:

- Anfangsversickerungsrate: 50 ÷ 300 l/(s·ha)

[36] ursprünglich in erster Linie nicht befestigte; später auch durchlässig befestigte Flächen

[37] Verworn, H.-R. (1999)

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

[39] Schmitt, T. G. (2000)

- Endversickerungsrate: 5 ÷ 30 l/(s·ha)
- Abnahmekoeffizient: 0,03 ÷ 0,2 min^{-1}
- Regenerationskoeffizient: 0,001 ÷ 0,0001 min^{-1}

In Untersuchungen von Schmitt und Illgen[40] 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 Infiltrationsverläufen 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.[41]

Tabelle 5: Parameterwerte zur Abflussbildung nach Schmitt und Illgen (2001)

Flächenbefestigung		Verlusthöhen		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		$h_{V,B}$	$h_{V,M}$	f_o	f_e	k	f_o	f_e	k	Ergebnis ψ_s	Zielwert ψ_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
Fugen-Verbundsteine, 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

$h_{V,B}$: Benetzungsverlusthöhe [mm] f_o: Angfangsversickerungsrate [l/(s·ha)] k: Abnahmekoeffizient [h^{-1}]
$h_{V,M}$: Muldenverlusthöhe [mm] f_e: Endversickerungsrate [l/(s·ha)] ψ_S: Spitzenabflussbeiwert [-]

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

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

Die aus den Einzelkalibrierungen an die Messwerte resultierenden Anfangs- und Endinfiltrationsraten sind exemplarisch für die Flächentypen „fugenarmes Normalpflaster" sowie „Sickerfugenpflaster" in den beiden nachstehenden Abbildungen aufgetragen. Die beiden Abbildungen veranschaulichen sowohl die große Schwankungsbreite beim tatsächlichen (messbaren) Infiltrationsvermögen von wasserdurchlässigen Flächenbelägen als auch bei den zur modelltechnischen Nachbildung zu wählenden Parameterwerten und unterstreichen damit die Unsicherheiten, die derzeit mit der Modellierung wasserdurchlässiger Flächenbeläge verbunden sind. Zudem zeigen sie die Diskrepanzen auf, die zwischen Messwerten an bestehenden Flächen und den im technischen Regelwerk empfohlenen Abflussbeiwerten bestehen.

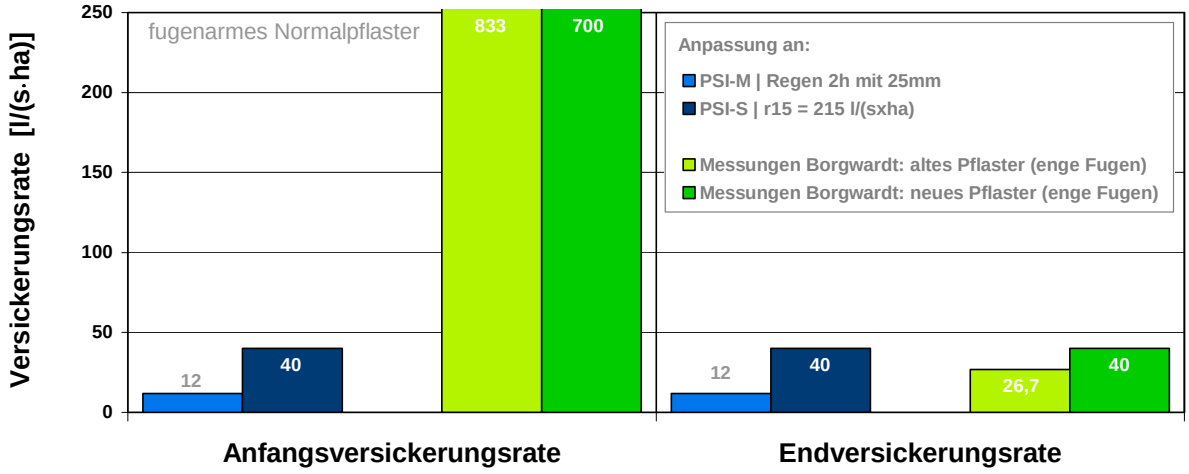


Abbildung 7: **Modellparameter nach Anpassung an Abflussbeiwerte und gemessene Infiltrationsverläufe für fugenarmes Normalpflaster**[40]

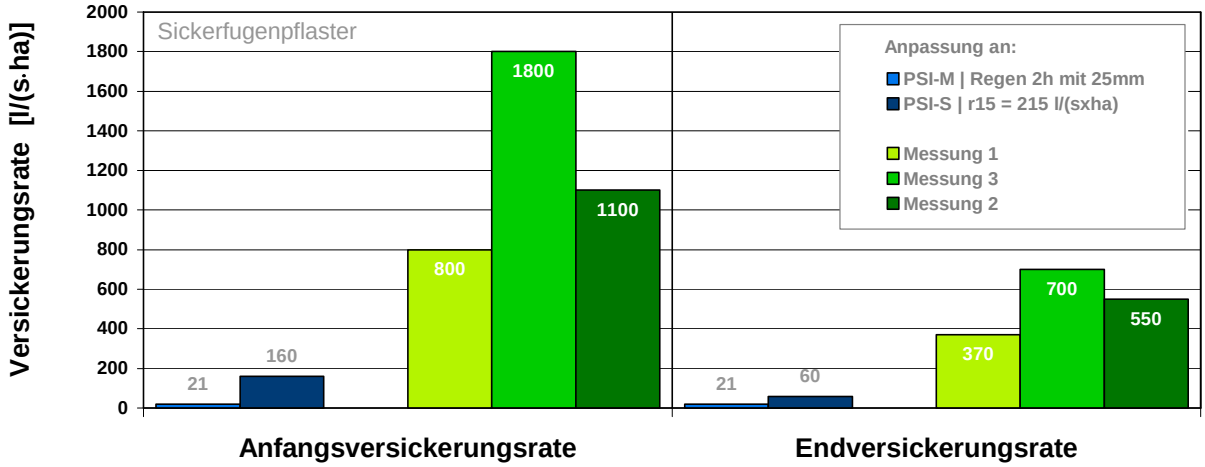


Abbildung 8: **Modellparameter nach Anpassung an Abflussbeiwerte und gemessene Infiltrationsverläufe für Sickerfugenpflaster**[40]

Darüber hinaus werden die Defizite im Ansatz von Horton/Paulsen ersichtlich, ist der Berechnungsansatz doch nicht in der Lage, mit einer einheitlichen Parametereinstellung plausible Ergebniswerte für unterschiedliche Niederschlagsbelas-

tungen 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.

Neben dem Ansatz von Horton/Paulsen ist in Deutschland auch das Infiltrationsmodell von Neumann (1976) gebräuchlich, das Füllungs- und Entleerungsvorgänge 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.[42] (Verworn und Kenter, 1993).

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.[43]

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 für das vorliegende Forschungsprojekt bedeutsamsten Untersu-

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

43 z.B. Akan, A.O. (2003); Akan, A.O. und Houghtalen, R.J. (2003); Maniak, U. (1993) oder Maidment, D. R. (1993)

chungen 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 jedoch 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.[44] 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 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

[44] Berliner Wasserwerke (Hrsg.) (1984)

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.[45] 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 Regenwassers 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).[46] 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 Jahres-

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

[46] nach Nobis-Wichterding, H. (1993) zitiert in Münchow, B. (1999)

niederschlagshöhe als auch bezogen auf die in den Flächenaufbau infiltrierte Regenwassermenge – erheblich.

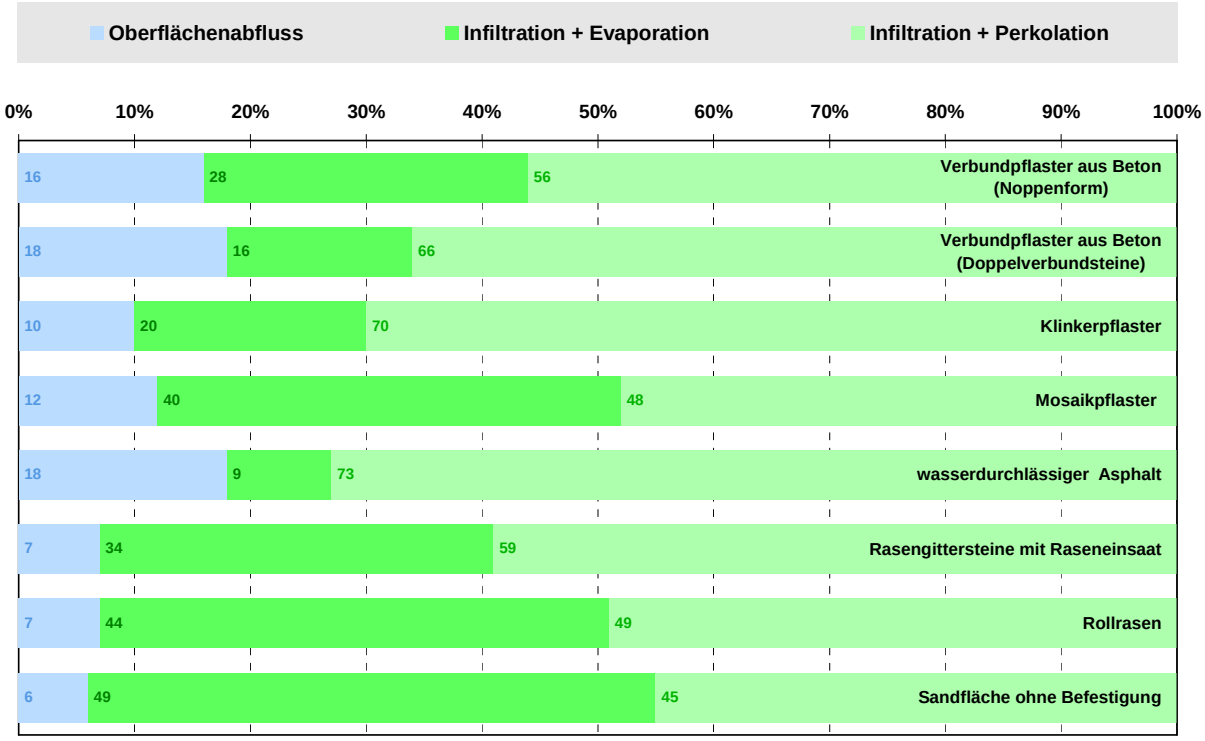


Abbildung 9: **Anteile des Oberflächenabflusses, der Infiltration, Evaporation und Perkolation an der Jahresniederschlagshöhe für verschiedene Flächenbefestigungen**[47]

Binnewies und Schütz untersuchten Mitte der 1980er Jahre im Auftrag der Baubehörde der Stadt Hamburg ebenfalls das Versickerungsvermögen verschiedener Pflasterbeläge.[48] 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

[47] *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.

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

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 wiedergegeben sind. Sie dokumentieren das sehr hohe Versickerungsvermögen insbesondere von begrünten Flächenbefestigungen mit hohem Anteil an versickerungswirksamer Fläche.

Tabelle 6: Endversickerungsraten für verschiedene naturnahe Flächenbefestigungen nach Dellwig[49]

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

Kretzer und Ruid-Rodrigez (TH Darmstadt) wandten zur Beprobung des Versickerungsvermögens von Pflasterflächen erstmals in Deutschland ein Tropfinfiltrometer an, mit dem eine künstliche Beregnung der Untersuchungsfläche erfolgen kann.[50] 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

[49] Dellwig, M. (1988)

[50] Kretzer, H. und Ruiz-Rodriguez, E. (1992)

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.[51] 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 den 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 4). Eine Gegenüberstellung der Messwerte an neuen und alten Pflasterflächen zeigt nachstehende Abbildung 10. Weitere Ergebnisdarstellungen sind im Anhang enthalten.

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.

[51] Borgwardt, S. (1995)

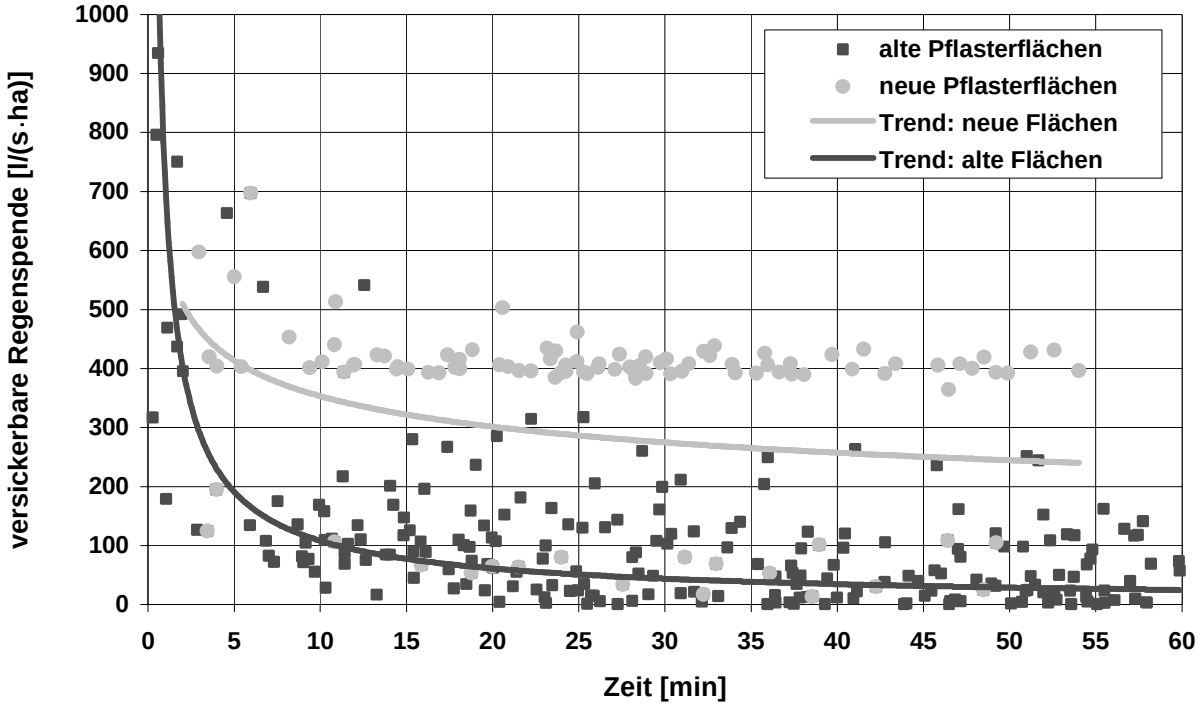


Abbildung 10: Messwerte von Borgwardt an neuen und alten Pflasterflächen und daraus abgeleitete Regressionskurven der Infiltrationsrate[52]

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 quantifizieren. Er stellte dabei deutliche Unterschiede in der Infiltrationsleistung von neu eingebauten gegenüber gealterten Pflasterflächen fest. 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

[52] nach Borgwardt (1995)

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.

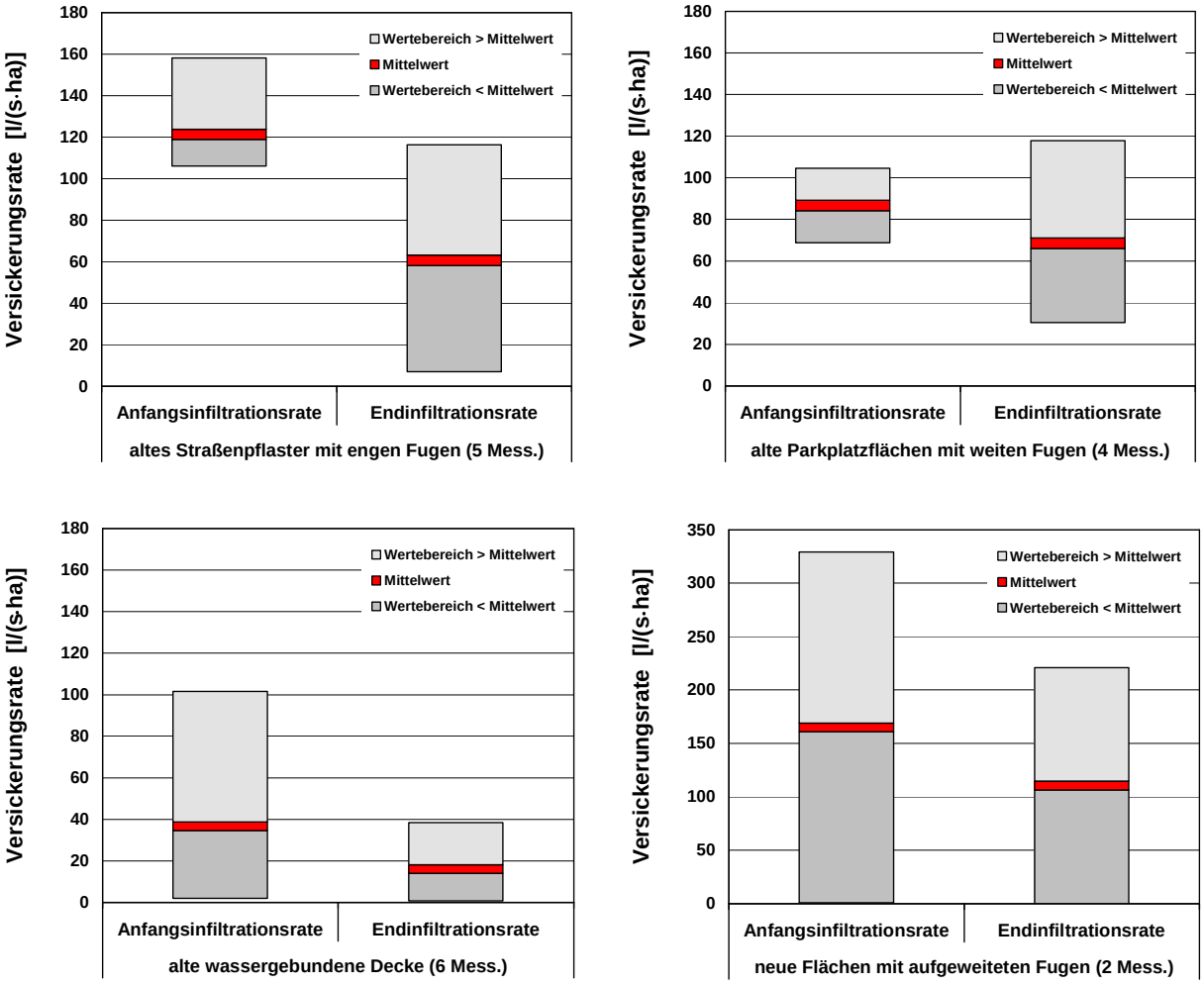


Abbildung 11: Bandbreite der von Borgwardt gemessenen Anfangs- und Endinfiltrationsraten für verschieden Belagstypen[53]

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

53 nach Messdaten von Borgwardt; Anfangsinfiltrationsraten = Messwerten nach 10 Minuten

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.

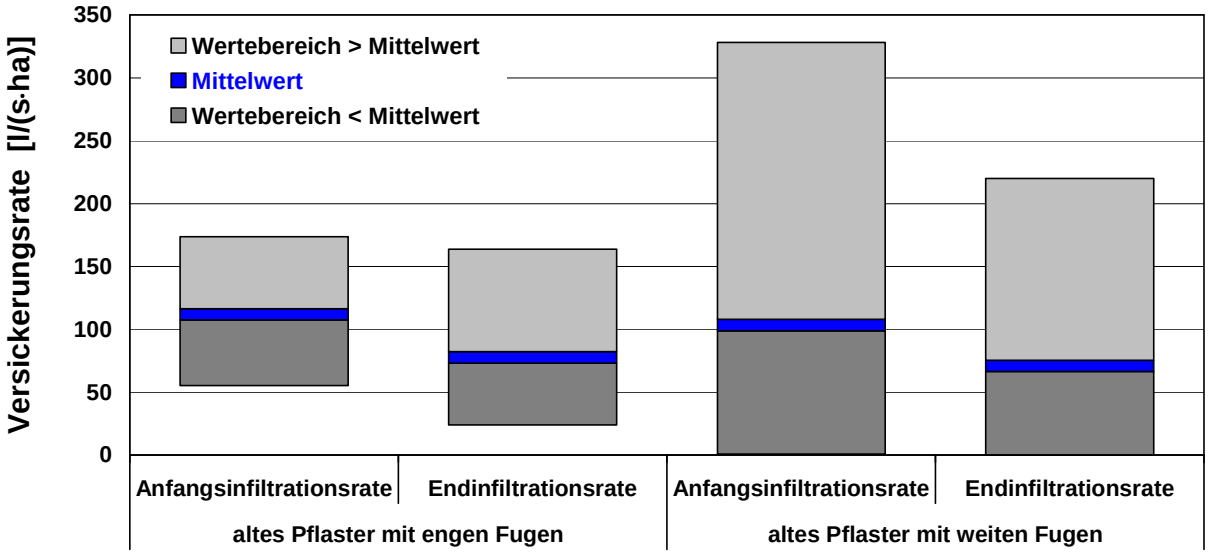


Abbildung 12: Anfangs- und Endinfiltrationsraten für alte Pflasterflächen mit engen und mit weiten Fugen[54]

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 Abflussspende ergibt sich hierbei aus der Differenz der zugrunde gelegten Regenspende $r_{(15)}$ und der versickerbaren Regenspende $i_{(15)}$.[55] 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 bzgl. der Liegezeit der Fläche einen Abflussbeiwert von 0,4-0,6.

---

54 abgeleitet aus Messdaten von Borgwardt

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

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.

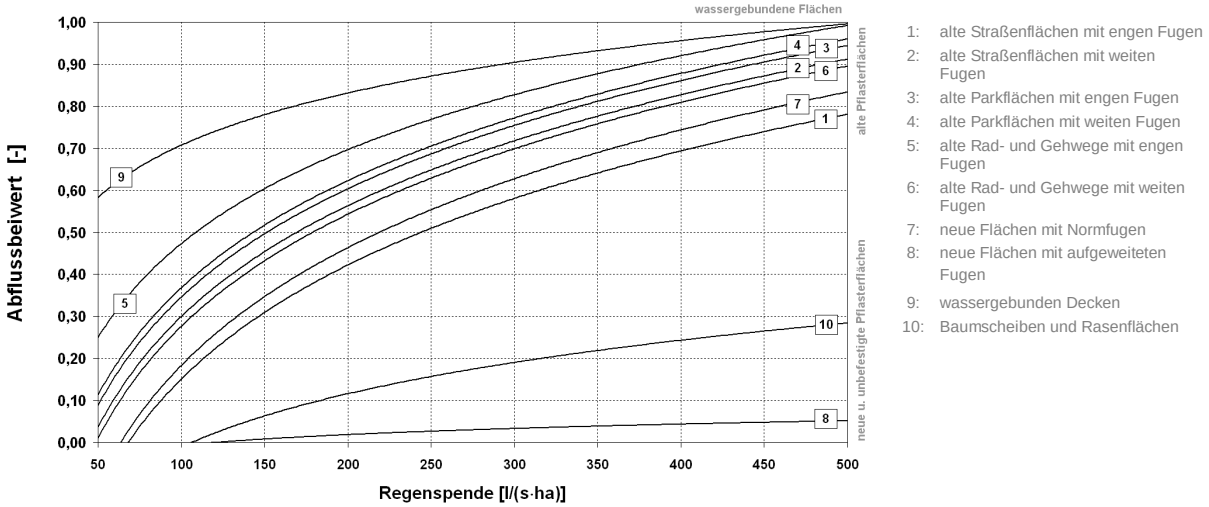


Abbildung 13: Spitzenabflussbeiwerte für verschiedene Flächenbefestigungen für eine 15-minütige Beregnung nach Borgwardt

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.[56] Zu diesem Ergebnis kam bereits auch schon Floss im Jahre 1985.[57] Borgwardts Ansicht über das Versickerungsvermögen begrünter Pflasterbeläge (s.o.) kann dagegen nicht geteilt werden. Flöter wies bspw. nach, dass bei begrünten Fugen die Wasserdurchlässigkeit mit fortwährender Standzeit erhalten bleibt oder im Vergleich zum Ausgangszustand gar anwachsen kann.[58] 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 Forschungsprojek-

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

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

58 Flöter, O. (1996) zitiert in Flöter, O. (2006)

tes von Hanses et al..[59] 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 l/(s·ha)) durchgeführt. Während des zweijährigen Beobachtungszeitraumes war an der Testfläche weder durch natürliche noch durch künstliche Beregnung ein Oberflächenabfluss festzustellen. Hanses et al. kamen zu der Schlussfolgerung, dass die Pflasterbauweise keinen Einfluss auf das Versickerungsverhalten der Fläche hat, solange ihr Infiltrationsvermögen größer als die aufgebrachte Niederschlagsintensität ist. 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 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 Münchow[60] im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Umweltforschungszentrums Leipzig-Halle[61] 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.

---

59 Hanses, U. et al (1999)

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

61 heute: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ

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 i.d.R. 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.[62]

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 Trocken- und 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 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

[62] nach Schiffler G. R. (1992), zitiert in Breuste et al. (1996)

Pflasterbelägen und von 20-150 l/(s·ha) bei neuen Belägen sehr gering, da selbst für besonders versickerungsaktive Belagstypen wie Rasengittersteine und Rasenfugenpflaster im Neuzustand Versickerungsraten von deutlich unter 50 l/(s·ha) gemessen wurden.

Für die Fragestellung des vorliegenden Projektes 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 Abfluss- und Versickerungsverhalten verschiedener Pflasterflächen wurden von der Fachhochschule Osnabrück an einem stark frequentierten Parkplatz in Lingen durchgeführt.[63] Der Parkplatz setzt sich aus 41 unterschiedlichen Testflächen mit einer Größe von jeweils 45 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; i.d.R. sogar unter 0,20. Lediglich bei drei Starkregenereignissen 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.

---

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

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 ≤ 100 l/(s·ha) resultieren dabei i.d.R. Spitzenabflussbeiwerte < 0,40. Für die meisten Flächentypen lieferten erst Beregnungsintensitäten ≥ 200 l/(s·ha) Spitzenabflussbeiwerte ≥ 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 Forschungsprojektes wurden wertvolle Daten zum Abfluss- und Versickerungsverhalten 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 bzgl. der Abflussbildungs- und Versickerungsprozesse von versickerungsaktiven Flächenbefestigungen konnte die Untersuchung leider weniger beitragen als dies aufgrund der reichhaltigen Datenbasis durchaus möglich gewesen wäre.

Anhand der bei Timmermann (1998) ausgewiesenen Messwerte wurde eine vereinfachte Analyse der Infiltrationsraten in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität durchgeführt. Hierbei wurden die Messwerte des Oberflächenabflusses, die sich für die künstlichen Beregnungen mit Intensitäten von 70-300 l/(s·ha) ergaben, ohne Berücksichtigung von Benetzungsverlusten in Infiltrationsraten umgerechnet. Abbildung 14 zeigt die je Beregnungsstufe gemittelten Versickerungsraten für vier verschiedene Testfelder. Darin ist zu erkennen, dass die Infiltrationsrate bei allen Pflastertypen mit zunehmender Beregnungsintensität steigt, obwohl bei den meisten Intensitätsstufen bereits ein nennenswerter

Oberflächenabfluss eingesetzt hat. Dieses Phänomen wird in der Literatur bislang nicht beschrieben, obwohl auch die Ergebnisse der Berliner Wasserwerke dieses Phänomen zeigen (allerdings auch dort, ohne es besonders zu thematisieren). Vielmehr ging man i.d.R. davon aus, dass es für eine Pflasterfläche eine bestimmte maximal mögliche Versickerungsrate gibt und dass ein entsprechender Oberflächenabfluss entsteht, sobald dieser Wert von der Regenintensität überschritten wird. Dagegen verdeutlichen die aus den Messwerten von Timmermann errechneten Versickerungsraten, dass bei Flächenbefestigungen in Pflasterbauweise ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Versickerungsrate und der aktuellen Regenintensität besteht. Dies unterstreicht, dass sich das Versickerungsverhalten von Pflasterbauweisen vom hydraulischen Verhalten natürlicher Böden unterscheidet.

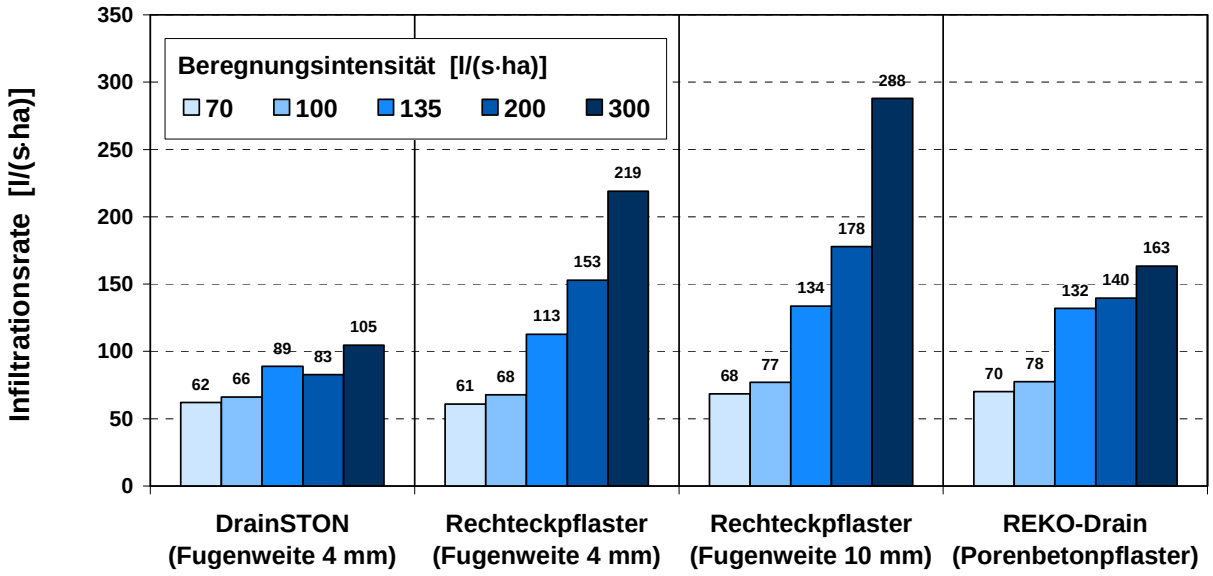


Abbildung 14: Mittlere Infiltrationsraten in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität für vier verschiedene Pflasterbauweisen[64]

Bei den in Abbildung 14 dargestellten Messwerten fällt darüber hinaus das beachtliche Versickerungsvermögen herkömmlicher Pflasterbauweisen mit gefügedichten Rechteck-Betonsteinen und mit Fugenweiten von lediglich rd. 4 mm sowie von 10 mm auf. Beide Beläge erreichten bei hohen Beregnungsintensitäten von ≥ 200 l/(s·ha) Infiltrationsraten von über 150 l/(s·ha) bis zu 220 l/(s·ha) bzw. 280 l/(s·ha). Damit übertreffen sie in den Versuchen die Versickerungsleistungen der betrachten Beläge aus Porenbetonpflasters sowie aus Sickerfugenpflaster z.T. deutlich.

[64] abgeleitet aus den Untersuchungsergebnissen von Timmermann, U. (1998); je Beregnungsstufe Mittelwerte aus i.d.R. 3-4 Einzelversuchen; die Beregnungsdauer betrug 20 Minuten

Das Versickerungsvermögen von Rasenfugenpflaster wurde von Kolb und Leopoldseder im Rahmen einer Versuchsreihe der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau untersucht.[65] 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 l/(m²·h) und 600 l/(m²·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.[66] 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. In diesem Forschungsprojekt, das ebenso wie das hier vorliegende Projekt vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV) gefördert wurde, haben Nolting et al. untersucht, inwiefern sich die Infiltrationsleistung versickerungsstarker 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 Versi-

[65] Kolb, W. und Leopoldseder, T. (2000)

[66] Kolb, W. und Frank, R. (1998)

ckerungsvermögen hat und ob zur Aufrechterhaltung der Funktionstüchtigkeit eine Reinigung der Beläge erforderlich ist.[67]

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 15.

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.[68] 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 ≤ 100 l/(s·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, dass sich eine ausgeprägte Vorbefeuchtung in erheblichem Maße auf die Versickerungsleistung auswirken kann. Die bei trockenem Belag festgestellten Infiltra-

---

67 Nolting, B. et al. (2005)

68 z.B. FGSV (1998) oder BDB (1996)

tionsraten von > 1000 l/(s·ha) reduzierten sich in feuchtem Zustand in beiden Fällen auf Werte < 300 l/(s·ha).

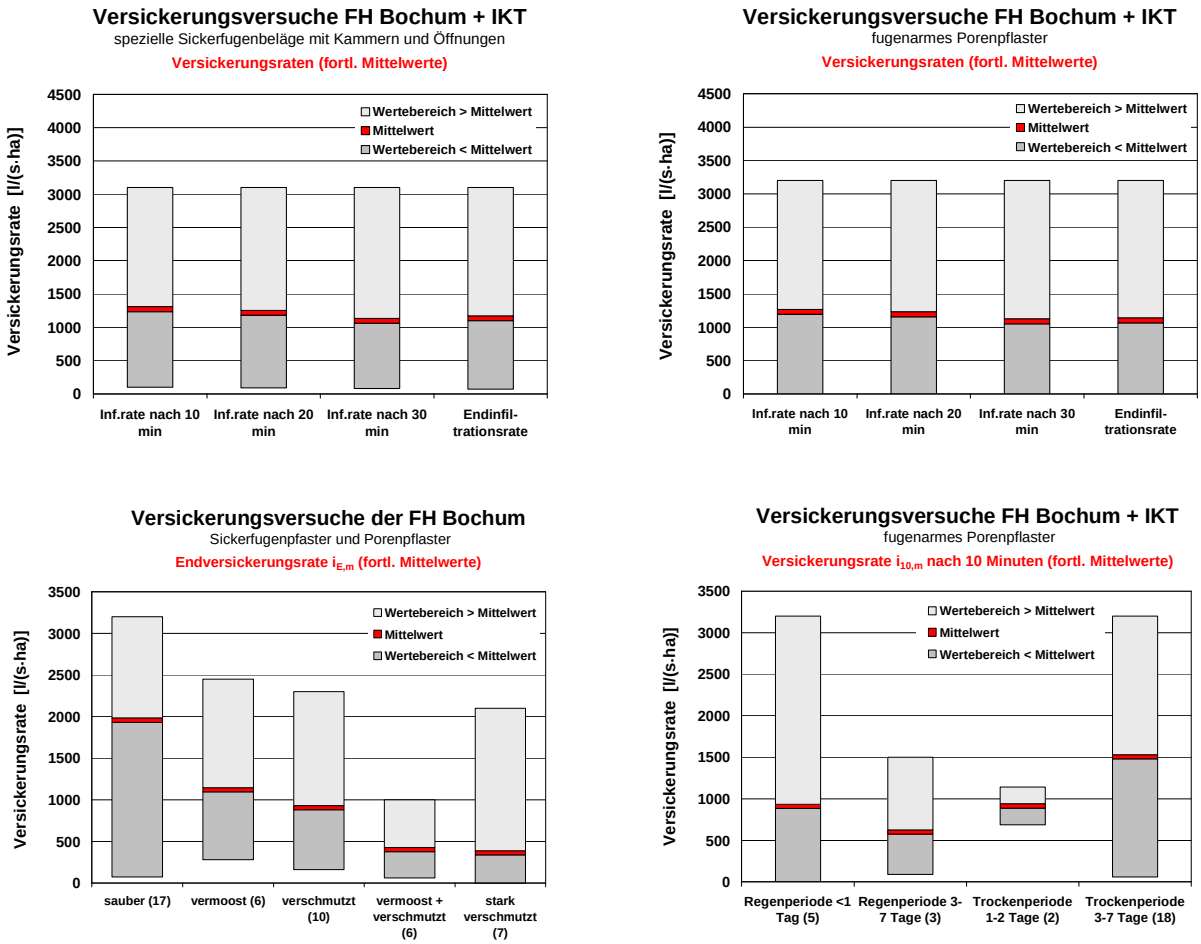


Abbildung 15: Bandbreite der von Nolting et al. gemessenen Versickerungsraten für verschiedene Sickerfugenbeläge und Pflasterflächen aus haufwerksporigen Betonsteinen[69]

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 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

69 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

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.[70] 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 $2{,}2 \cdot 10^{-2}$ auf $4{,}3 \cdot 10^{-3}$ 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 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. Dies ist möglicherweise genau der Effekt, der sich in den Messdaten von Timmermann sowie

[70] Flöter, O. (2006)

den Berliner Wasserwerken wieder findet. Leider fehlen auch bei Flöter hierzu konkrete 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.[71] 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.[72]

Bilanz der Literaturrecherche

Das vorliegende Kapitel gibt den bisherigen Kenntnisstand zum Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger Befestigungsraten wider. 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 bewusst verzichtet.

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. 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 ange-

71 Hunt, W. F. III and Bean, E. Z. (2006)

72 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

gebenen Zahlenwerten abweichende Versickerungsraten angetroffen werden. Dennoch stellen sie eine wichtige Vergleichsbasis für die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes dar.

Tabelle 7: Bandbreite des in der Fachliteratur angegebenen Versickerungsvermögens wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen im Gebrauchszustand

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

3 Material und Methoden

3.1 Untersuchungskonzept

Im Rahmen des hier dokumentierten Forschungsprojektes sollen detaillierte Erkenntnisse zum physikalischen Phänomen der Abflussbildung auf versickerungsfähig ausgebildeten Flächenbelägen gewonnen werden. Hierzu wurde in einem ersten Bearbeitungsschritt der bisherige Kenntnisstand zusammengetragen und in Kap. 2 ausführlich erörtert. Den Kern des Forschungsvorhabens bildet jedoch ein eigenes Messprogramm, bei dem das Abfluss- und Versickerungsverhalten durch Feldmessungen an Bestandsflächen sowie durch Lysimeterversuche im Labor systematisch untersucht wird. Der Fokus liegt dabei vorwiegend auf gering bis mäßig durchlässigen Pflasterbelägen, da diese bislang weniger Beachtung fanden, hinsichtlich des Abflussbeitrages zur Kanalisation jedoch von höherer Relevanz sind als versickerungsstarke Ökopflasterbeläge.

Im Rahmen der Messungen an Bestandsflächen wurden Versickerungswerte verschiedener Belagstypen im Gebrauchszustand nach mehrjähriger Nutzung gesammelt. Flächen vorwiegend gleichen Aufbaus wurden anschließend im Labor intensiv in rd. 140 Einzelversuchen für unterschiedliche Randbedingungen wie Niederschlagsintensität, Gefälle und Kolmationsgrad untersucht. 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 Analyse der wesentlichen Einflussfaktoren auf das Versickerungsvermögen ermöglichen. Die messtechnischen Untersuchungen an Bestandsflächen sowie im Labor umfassen insgesamt folgende Belagstypen:

- versickerungsschwache Plattenbeläge mit geringen Fugenweiten von 3-4 mm (Fugenanteile 0,6%, 1,2% und 1,8%)
- gering bis mäßig durchlässige Rechteck- und Verbundpflasterbeläge mit geringen Fugenweiten von 3-4 mm (Fugenanteile 4-5%)
- moderat durchlässiges Rechteckpflaster mit größeren Fugenweiten von 7 mm und 10 mm (Fugenanteile 10-14%)
- versickerungsstarke Pflasterbeläge aus Sickerfugensteinen mit speziellen Kammern oder Rinnen (Fugenanteile 4-10%)

- besonders durchlässige Pflasterbeläge aus wasserdurchlässigem Porenbeton mit geringen sowie mit großen Fugenweiten von 3-25 mm.

3.2 Untersuchungsmethodik der Feldmessungen an Bestandsflächen

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

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 (∅ 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 Forschungsprojek-

tes von Nolting et al..[73] Ein erläuternde Abbildung findet sich darüber hinaus im Anhang des vorliegenden Berichtes (Abbildung A - 7).

Im Rahmen der Untersuchung wurden 21 Infiltrometertests auf sechs unterschiedlichen Pflastersystemen durchgeführt. Hierbei wurde jeder Belag an mehreren Stellen in der Örtlichkeit beprobt. Die Messungen umfassen dabei Flächenbeläge aus herkömmlichem Betonpflaster mit Fugenweiten von 3-4 mm sowie mit einer Fugenweite von rd. 10 mm, zwei verschiedene Beläge aus fugenarm verlegtem Porenbetonpflaster[74], einen Verbundpflasterbelag mit splittgefüllten Sickeröffnungen sowie einen fugenarmen Pflasterbelag aus gefügedichten Sickerfugensteinen mit horizontal und vertikal verlaufenden Sickerkanälen. Eine Übersicht der untersuchten Pflasterbeläge sowie die wesentlichen Flächencharakteristika sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Übersicht der Untersuchungsflächen der Infiltrometermessungen[75]

Ort	Belagstyp	Fugenweite	Fugenmaterial	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)
Gelsenkirchen	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)

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

[73] Nolting et al. (2005)

[74] an einem Messpunkt auch mit einer größeren Fugenbreite von 25 mm

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

Bei allen betrachteten Untersuchungsflächen handelt es sich um regelkonform errichtete Pflasterbeläge mit Betonsteinen namhafter und umsatzstarker Hersteller. Die Mehrzahl der Flächen wird als Parkplatz oder Zufahrtsweg genutzt; ein Pflasterbelag stellt die Flächenbefestigung eines Schulhofes dar. Die Liegezeiten der Untersuchungsflächen betrugen zum Zeitpunkt der Messungen zwischen vier und zehn Jahren. Einige der untersuchten Flächen liegen auf dem Parkplatz in Lingen, auf dem Timmermann[76] ihre Langzeituntersuchungen durchgeführt hat (siehe Kap. 2.4).

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

3.3 Untersuchungsmethodik der Laborversuche

Den Kern des messtechnischen Untersuchungsprogramms bilden umfangreiche Beregnungsversuche an einer Lysimeteranlage am IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur (IKT).[77] 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 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.

Die systematische Analyse der maßgeblichen Einflussfaktoren erfolgt daher geeigneter Weise im Rahmen von Laboruntersuchungen. Die Variation jeweils nur einer dieser Randbedingungen im Versuchszyklus erlaubt eine eindeutige

---

[76] Timmermann, U. (1998), (2000) und (2001)

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

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.

3.3.1 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.[78]

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

[78] Die Gleichwertigkeit der Anlagen und die Reproduzierbarkeit der Prüfungsergebnisse wurden im Vorfeld der Inbetriebnahme durch Vergleichsprüfungen an beiden Versuchsanlagen (Gelsenkirchen und Würzburg) sichergestellt (siehe Bosseler, B. et al. (2004).

- 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 Sicherwassers.

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),
- fortlaufende zeit- und mengenmäßige Erfassung des Oberflächenabflusses über eine Kombination aus Kippzähler und Präzisionswaage,
- fortlaufende zeit- und mengenmäßige Erfassung des Sickerabflusses über einen Kippzähler.

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 16.

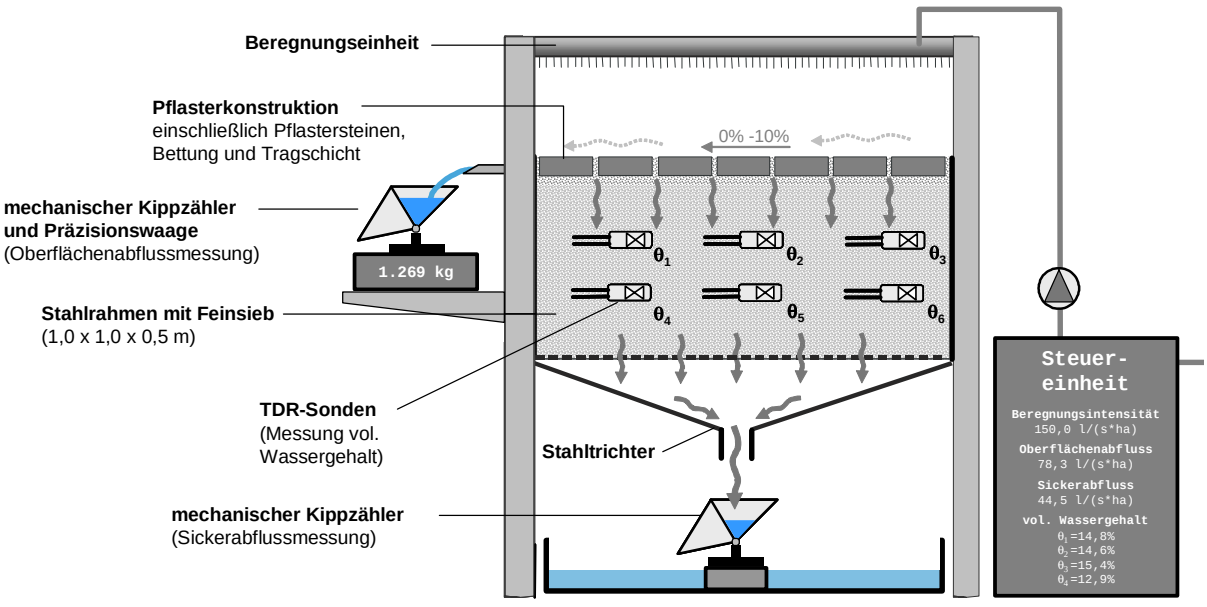


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Lysimeteranlage

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.

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, Oberflächen- und Sickerabfluss) sowie die volumetrischen Wassergehalten in der Tragschicht werden mit einer zeitlichen Auflösung von 10-30 Sekunden fortlaufend aufge-

zeichnet. 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).

3.3.2 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 geeignetste Methode zur Simulation des Feinpartikeleintrages, da es von seiner Körnungsstruktur dem Feinmaterial, das man in den Fugen von Oberflächenbefestigungen findet, sehr ähnelt.[79] 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 durchgeführten Infiltrometermessungen an den z.T. baugleichen Flächenbelägen sowie den in der Literatur angegebenen Wertebereichen. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden darüber hinaus auch an den im Labor untersuchten und mit Quarzmehl beaufschlagten Testflächen Infiltrationsversuche analog den Versuchen in situ durchgeführt. 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

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

Laboruntersuchungen mit klar definierten und reproduzierbaren Versuchsbedingungen mit dem Abfluss- und Versickerungsverhalten von Flächenbefestigungen unter realen Nutzungsbedingungen und nach mehrjähriger Standzeit zu verknüpfen.

3.3.3 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 9 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 300 l/(s·ha) und 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.

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) 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.

Tabelle 9: Übersicht der Versuchsserien am Lysimeter

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

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

Sehr intensiv wurde das Abfluss- und Versickerungsverhalten eines fugenarmen Pflasterbelages aus Doppelverbundpflaster untersucht, auch wenn dieser Flä-

chentyp nicht durch eigene In-situ-Messungen abgedeckt wird. Doppelverbundpflaster stellt jedoch eine klassische und überaus weit verbreitete Pflasterbauweise dar, die auch heute noch sehr 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 mm[80], einmal mit einer Fugenweite von 7 mm (Fugenanteile ca. 14% und 10%) sowie ein fugenarmes Betonpflaster aus Rechtecksteinen (ohne Tragschicht sowie auf Splitt-Bettung)[81] und ein poröser Pflasterbelag aus hauwerksporigen 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 Versickerungsvermögens 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 Ver-

[80] analog dem Pflasterbelag in den Versuchsserien 1 und 4

[81] analog dem Pflasterbelag in der Versuchsserie 2

suchszyklus 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.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Infiltrationsversuche an Bestandsflächen

Nachfolgend werden die im Rahmen der Infiltrometermessungen an den Standorten in Lingen, Gelsenkirchen, Kevelaer und Straelen in situ gewonnen Messdaten zum Versickerungsvermögen dargestellt und diskutiert.[82]

Auf dem bereits von der Fachhochschule Osnabrück intensiv untersuchten Parkplatz in Lingen, der 1994 im Rahmen des damaligen Projektes als Versuchsanlage errichtet worden ist, wurde das Versickerungsvermögen von vier unterschiedlichen Pflasterbauweisen mit Hilfe eines Tropfinfiltrometers beprobt (Abbildung A - 7). Das Oberflächengefälle der Testflächen beträgt jeweils 2,5%.



Abbildung 17: Untersuchungsflächen am Standort Lingen

Vier Infiltrometermessungen wurden auf einem Stellplatz des Parkplatzes aus fugenarm verlegten Rechtecksteinen[83] durchgeführt; davon zwei Messungen jeweils im Zentrum des Stellplatzes und zwei Messungen in Bereichen, in denen verstärkte mechanische Belastungen durch ein- und ausparkende Fahrzeuge auftreten (Radspur des Stellplatzes[84]). Die in Abbildung 18 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

---

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

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

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

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, so dass die Fläche zeitweilig mit weniger Wasser beregnet wurde.

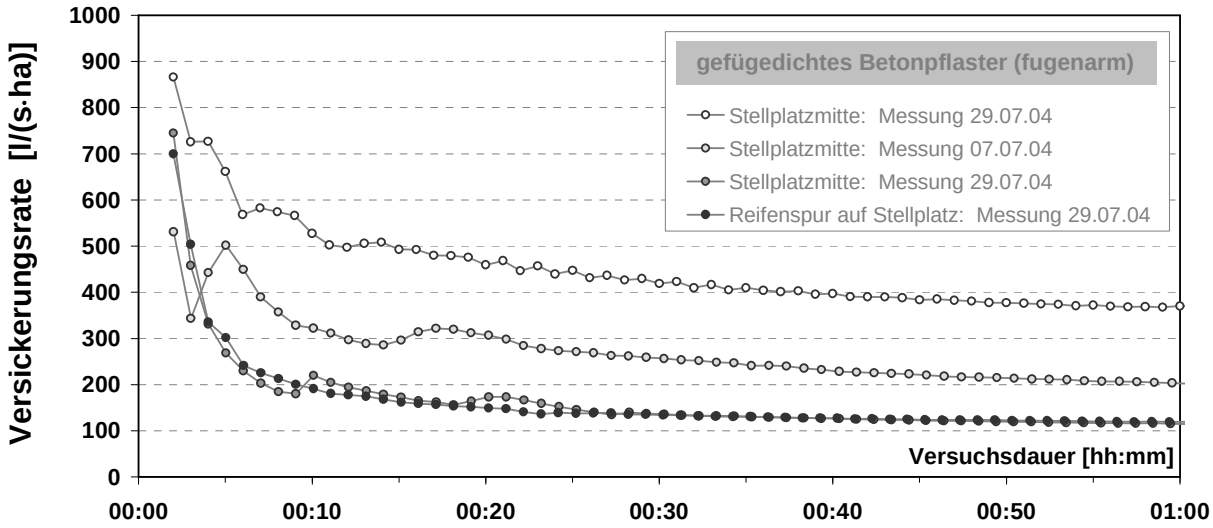


Abbildung 18: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an fugenarmem Standardpflaster aus gefügedichten Betonsteinen[85]

Die dargestellten Infiltrationsverläufe dokumentieren die hohe kleinräumige Variabilität in den Versickerungsleistungen, liegen die Messpunkte doch allesamt in einem Radius von rd. zwei Metern. Insgesamt überrascht zudem das mit Infiltrationsraten von z.T. deutlich über 100 l/(s·ha) ausgesprochen hohe Versickerungsvermögen dieses als eher gering wasserdurchlässig eingeschätzten Belages. 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 19 dargestellten Infiltrationsverläufe[86]. Beprobt wurden hier zwei Stellen, wiederum in Stellplatzmitte und im Bereich der Radspur. Auch hier zeigt

[85] 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 - 10).

[86] Hersteller: behaton; Rechteckstein mit Abstandhaltern; Fugenmaterial: Splitt 2/5 mm

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 zwischen 75 l/(s·ha) und 600 l/(s·ha).

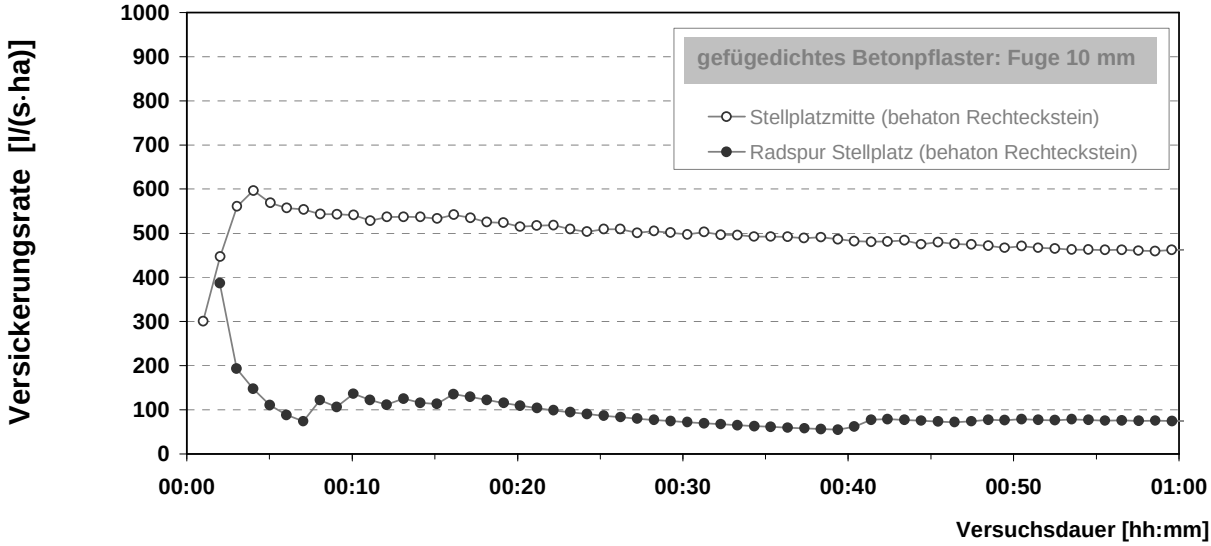


Abbildung 19: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an Sickerfugenpflaster aus gefügedichten Betonsteinen mit 10 mm breiten, splittverfüllten Fugen

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 Porenpflasterbelag[87] erfolgt die Versickerung sowohl über die mit gewaschenem Sand[88] gefüllten Fugen von 3-4 mm Breite als auch durch die offenporige Steinstruktur. Im Gegensatz dazu besteht das Sickerfugenpflaster[89] aus gefügedichten Betonsteinen, die eine Versickerung ausschließlich über die mit einem grobkörnigen Sand-Splitt-Gemisch[90] 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

87 Hersteller: Rekers; Pflasterstein: REKO-Drain

88 Körnung 0/5 mm

89 Hersteller: Klostermann; Pflasterstein: drainSTON

90 firmeneigene Mischung mit Körnung 0/5 mm

Rillen zur besseren Ableitung des Wassers in die Unterkonstruktion. Die Ergebnisse der Infiltrometermessungen an diesen beiden Pflasterbelägen sind in Abbildung 20 grafisch dargestellt.

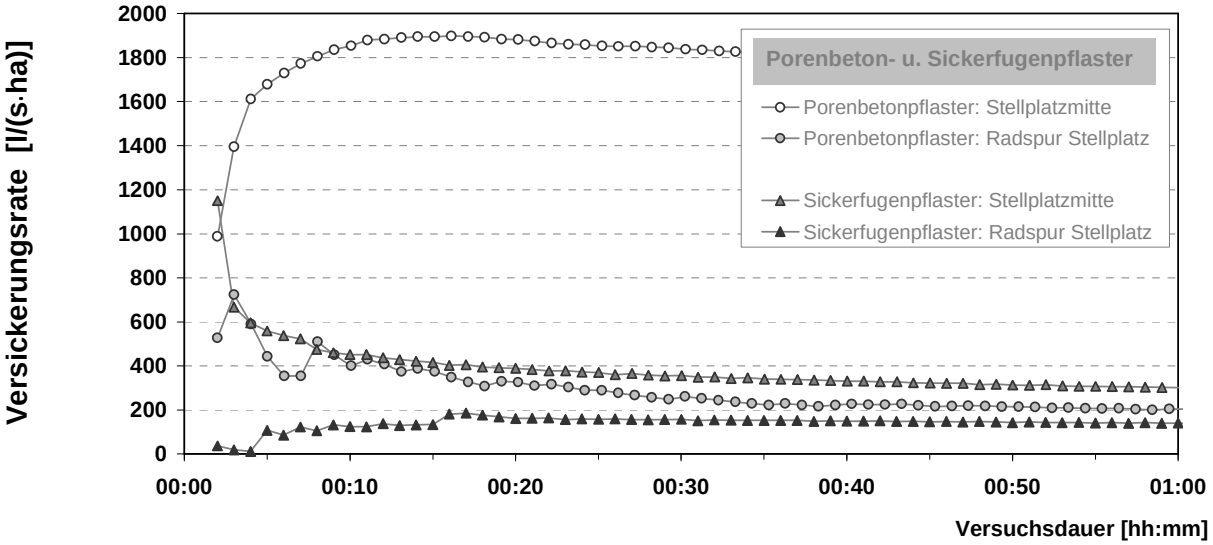


Abbildung 20: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an fugenarmem Porenbetonpflaster sowie an Sickerfugenpflaster mit speziell ausgebildeten Ableitungsrinnen

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 sich jedoch sukzessive bis zu einem Endwert von rd. 150 l/(s·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 l/(s·ha) mehr als doppelt so hoch als die Endinfiltrationsrate im Bereich der Radspur.

Aus den Ganglinienverläufen wurden charakteristische Infiltrationskennwerte extrahiert. Dabei wird die nach einer Versuchsdauer von 10 Minuten gemessene Infiltrationsrate in Analogie zu Borgwardt als (versuchsspezifische) Anfangsinfiltrationsrate definiert. Als Endinfiltrationsrate wird der Messwert nach einer Versuchsdauer von rd. 60 Minuten bezeichnet. In Abbildung 21 sind die Anfangs-

und 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 durchaus erstaunlich hohes Versickerungsvermögen aufweisen können.

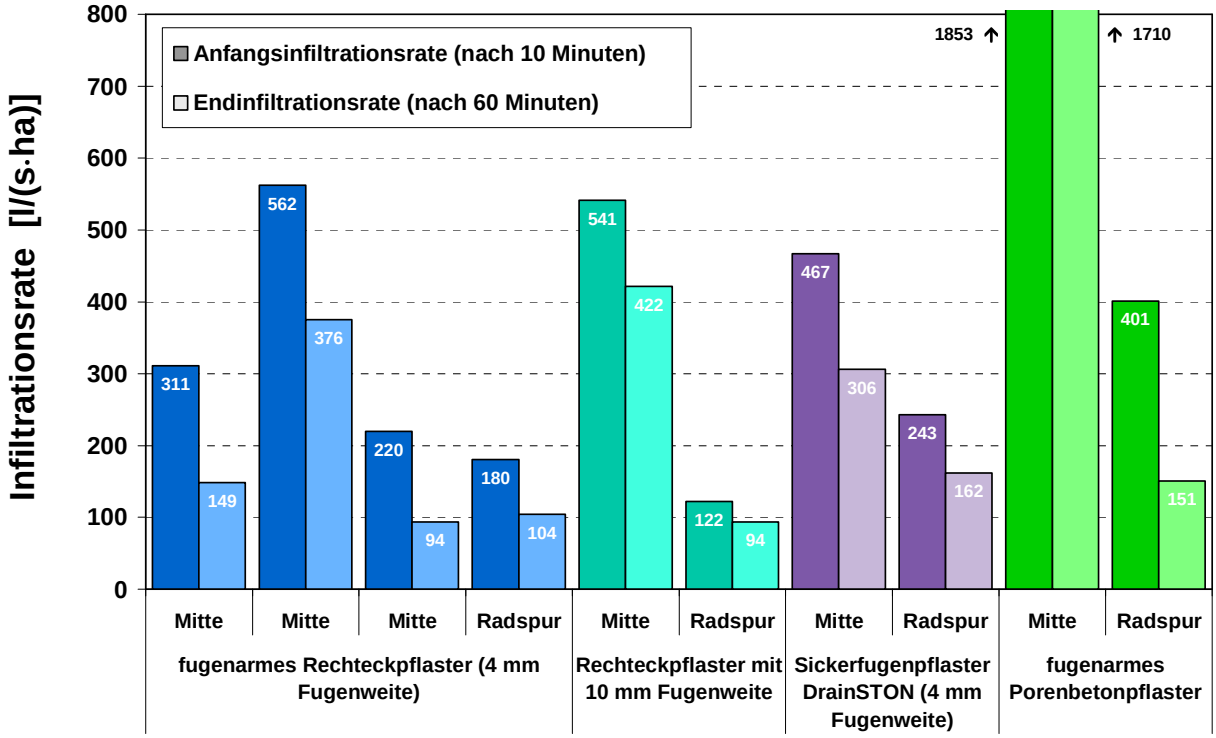


Abbildung 21: **Anfangs- und Endinfiltrationsraten der vier am Standort Lingen untersuchten Pflastertypen**

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 führt dazu, 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 Abbildung 14), 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 Gelsenkirchen[91] 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 22)[92].



Abbildung 22: 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 23 grafisch dargestellt.

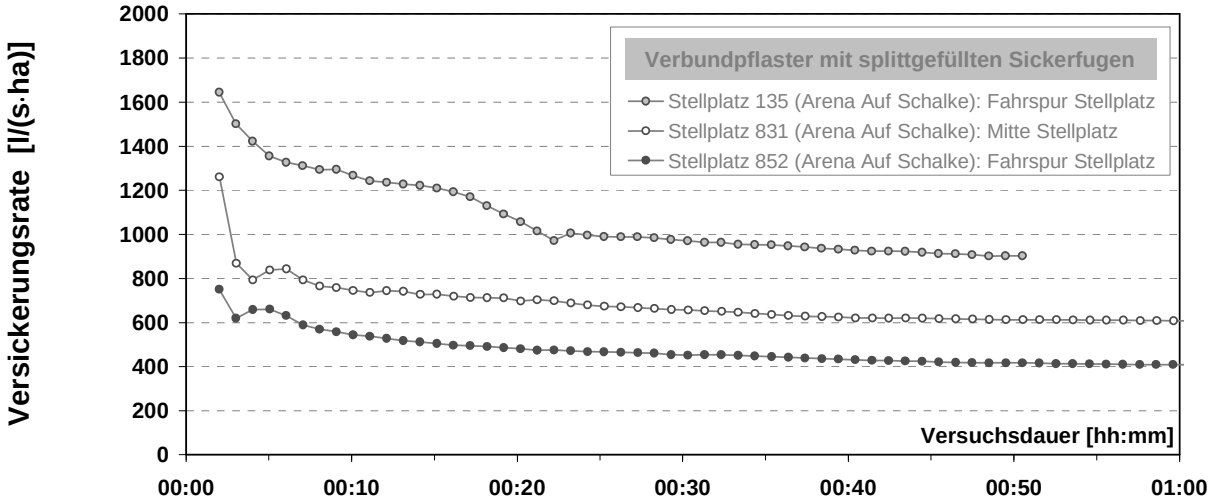


Abbildung 23: Infiltrationsganglinien aus den Messungen an Sickerfugenpflaster mit splittgefüllten Sickerkammern

Der untersuchte Sickerfugenbelag verfügt ebenfalls über ein sehr hohes Versickerungsvermögen, das an den Messpunkten auch nach 60 Minuten noch über

---

91 Parkplatz der Veltins Arena

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

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.

Abbildung 23 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 l/(s·ha), 600 l/(s·ha) sowie von 900 l/(s·ha).

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 jedoch 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 24).

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 allerdings darauf hin, dass Pflasterbauweisen mit splittgefüllten Fugen und Kammern dauerhaft eine sehr hohe Versickerungsleistung aufweisen können.[93] Verantwortlich hierfür ist offenbar das Phänomen, dass sich auf Splittschüttungen verschlämmende Feinpartikel nicht so leicht anlagern können.

[93] z.B. Hunt, W. F. III and Bean, E. Z. (2006)

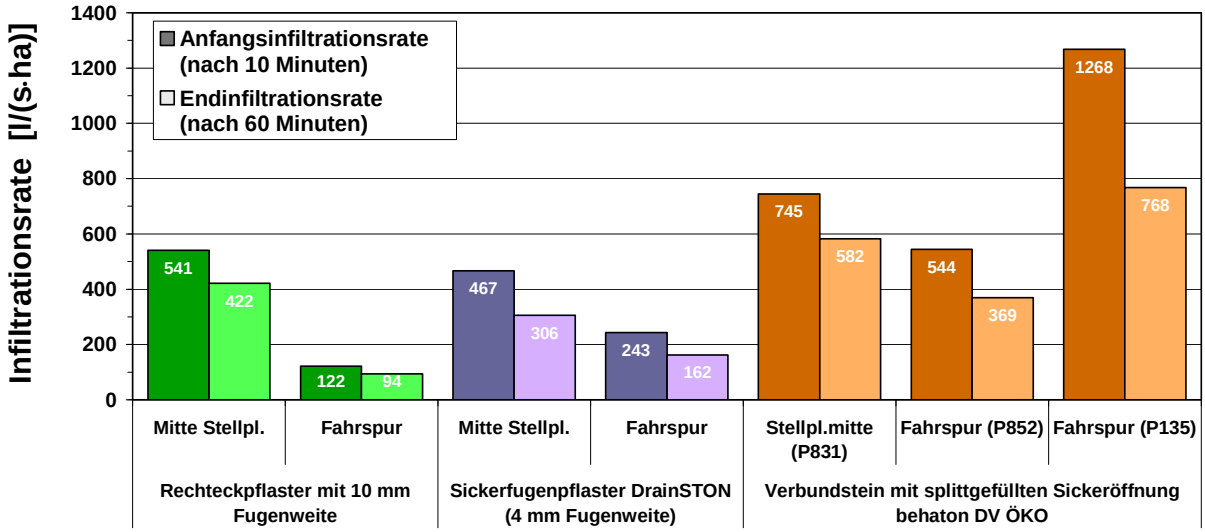


Abbildung 24: Gegenüberstellung der Versickerungsleistungen der untersuchten Sickerfugenbeläge

Im Rahmen der Felduntersuchungen wurden noch an zwei weiteren Standorten Infiltrometerversuche durchgeführt. Dabei wurden Pflasterbeläge aus Porenbetonsteinen auf einem Busparkplatz des Wallfahrtsortes Kevelaer sowie auf einem Schulhof in Straelen betrachtet (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26).[94]



Abbildung 25: Untersuchungsflächen am Standort Kevelaer (Busparkplatz)

[94] 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

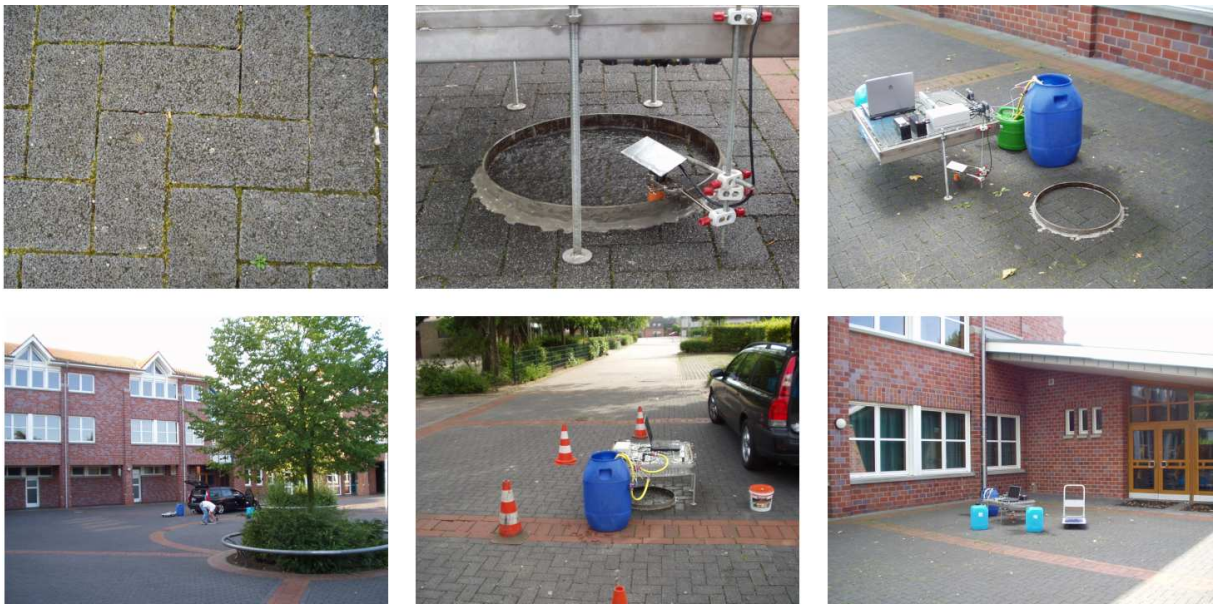


Abbildung 26: Untersuchungsflächen am Standort Straelen (Schulhof)

Die Infiltrationsraten an den untersuchten Messpunkten waren – mit einer Ausnahme – sehr hoch und weisen durchweg Werte von z.T. deutlich über 1.000 l/(s·ha) auf. Auf dem Busparkplatz in Kevelaer wurde jedoch auch ein Bereich untersucht, auf dem großflächig eine rote Asche[95] von einem nahe gelegenen Gehweg auf die Pflasterung aus Porenbeton getragen worden ist. Hier war das Versickerungsvermögen im Vergleich zu den übrigen Messpunkten in erheblichem Maße herabgesetzt (Faktor 100) und betrug nur noch 20-63 l/(s·ha). Abbildung 27 zeigt die Gegenüberstellung der Messwerte an beiden Standorten.

Auffällig sind hier v.a. die hohen Versickerungsraten, die am Standort Straelen in einem recht vermoosten Bereich des Schulhofes gemessen wurden. Eine Vermoosung oder Verkrautung der Fugen muss folglich nicht zwangsläufig mit einer Reduzierung des Versickerungsvermögens verbunden sein. Umgekehrt ist es auch möglich, dass die Wurzeln das Fugenmaterial auflockern oder bevorzugte Leitungsbahnen bei der Versickerung darstellen. Ansonsten sind die Infiltrationsraten der beiden Standorte recht heterogen, ohne dabei eine besondere Tendenz ausmachen zu können. Obwohl die Flächen in Kevelaer durch den Busverkehr einer sehr hohen mechanischen Belastung unterliegen, weisen die Flächen ebenso hohe Infiltrationsraten wie der Schulhof in Straelen auf. Dennoch unterstreicht Abbildung 27 einmal mehr die – auch kleinräumig anzutreffende – hohe Variabilität im Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger Pflasterbauweisen.

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

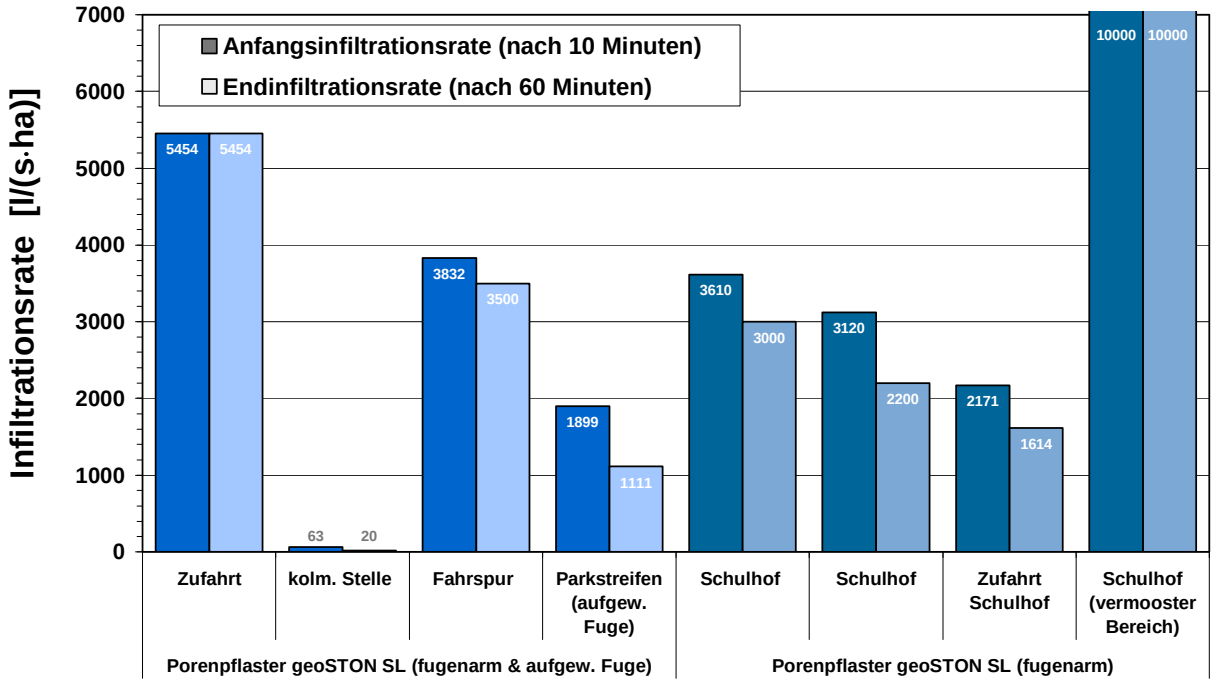


Abbildung 27: **Bandbreite der in Straelen und Kevelaer gemessenen Versickerungsraten an Pflasterbelägen aus haufwerksporigen Betonsteinen**

Fazit der Feldversuche

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

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

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

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

4.2 Beregnungsversuche im Labor

Anhand von Beregnungsversuchen an der in Kapitel 3.3.1 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 umfassten verschiedene Pflaster- und Plattenbeläge mit ganz unterschiedlichem Versickerungsvermögen. Die wesentlichen Ergebnisse der Labormessreihe werden nachfolgend zusammengefasst.

4.2.1 Fugenarm verlegte Pflasterbeläge aus gefügedichten Betonsteinen

Im Rahmen des Messprogramms im Labor wurden herkömmliche Pflasterbeläge aus fugenarm verlegten, gefügedichten Betonsteinen am intensivsten untersucht. Dabei wurden Messreihen an Belägen aus Doppelverbundpflaster sowie aus Rechtecksteinen vollzogen (siehe Abbildung 28). Den prinzipiellen Aufbau der im Lysimeter untersuchten Pflasterflächen zeigt Abbildung 29.

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.



Abbildung 28: Flächenbeläge aus fugenarmem Doppelverbund- und Rechteckpflaster

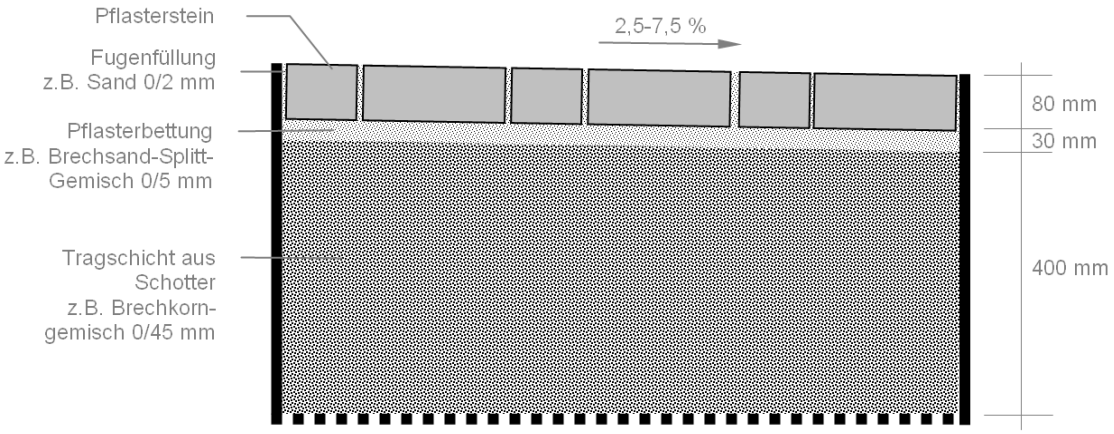


Abbildung 29: Schemaskizze des Pflasteraufbaus

In nachfolgender Abbildung 30 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 Kolmationsgrad. Die Beregnung erfolgte über einen Zeitraum von zwei Stunden mit einer konstanten Intensität von 100 l/(s·ha). Zum Vergleich sind in Abbildung 31 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 Benet-

zung 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 konstante als auch fortlaufend ansteigende oder abnehmende Infiltrationsraten beobachtet.

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 30 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 ist der gesamte Pflasteraufbau samt Tragschicht (sog. Oberbau) nahezu gleichmäßig durchströmt.

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.

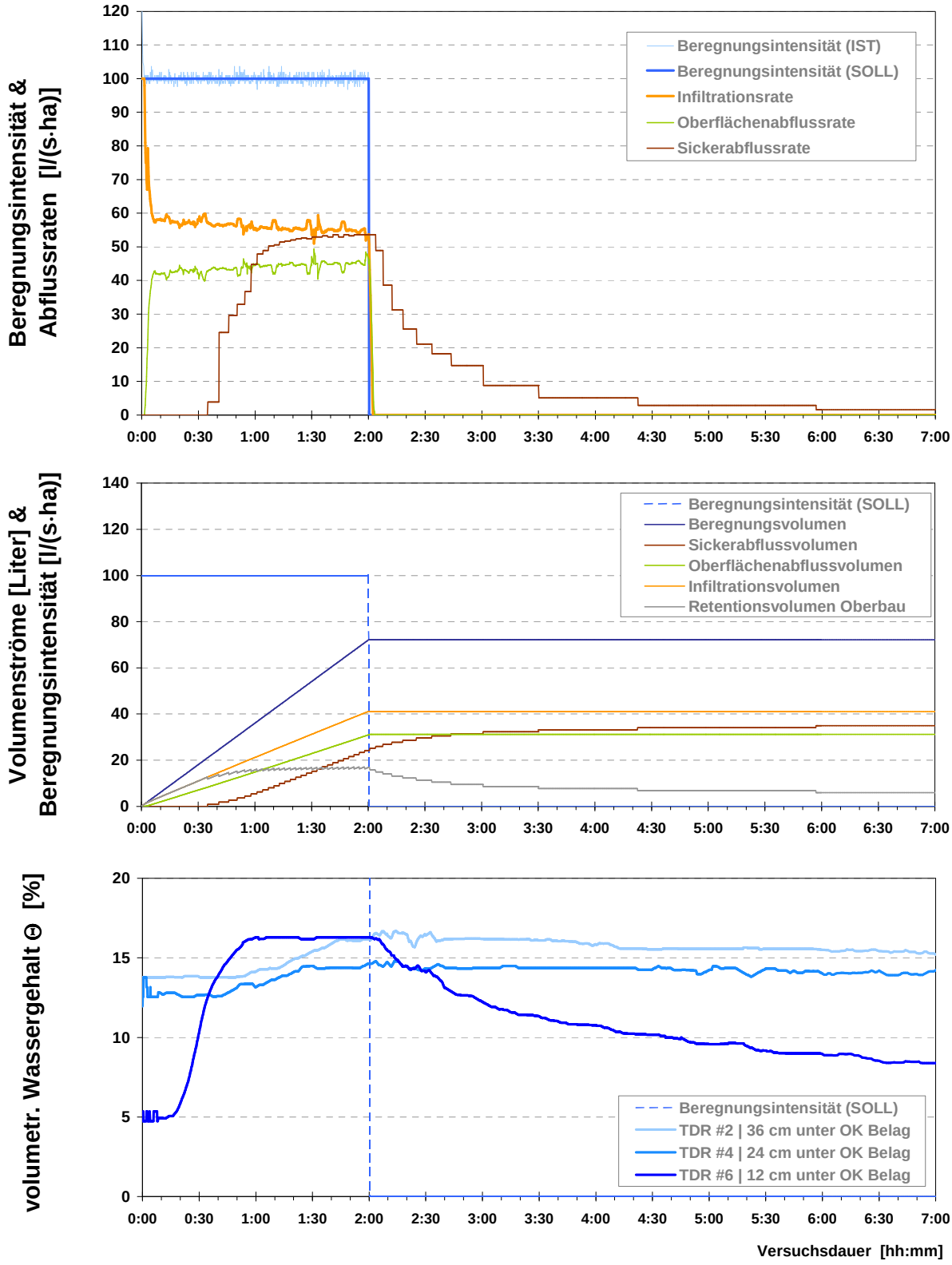


Abbildung 30: **Messwertdarstellung für einen Beregnungsversuch an Doppelverbund-pflaster mit 2,5% Gefälle (400 g/m² Quarzmehl, r = 100 l/(s·ha))**

Aufgrund der freien Drainage werden die Porenräume des Tragschichtmaterials nur teilweise gefüllt. Bei der in Abbildung 30 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 i.d.R. höhere Wassergehaltswerte auf als höher liegende.

Für das zweite dargestellte Beispiel in Abbildung 31 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 32). 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.

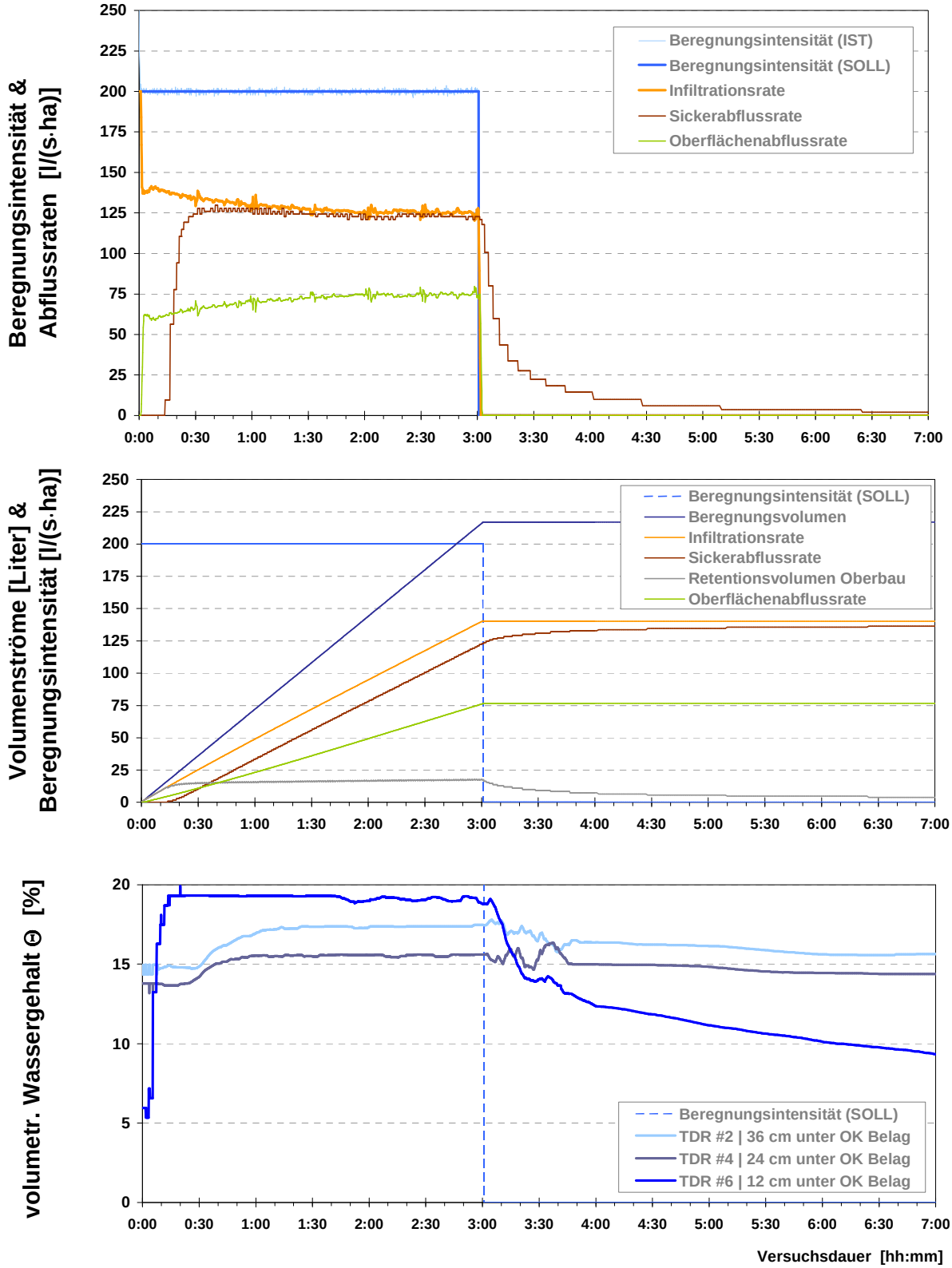


Abbildung 31: **Messwertdarstellung für einen Beregnungsversuch an Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle (200 g/m² Quarzmehl, r = 200 l/(s·ha))**

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

Abbildung 32: Matrix der an fugenarmem Doppelverbundpflaster durchgeführten Beregnungsversuche[96]

Abbildung 33 zeigt die bei verschiedenen Beregnungsintensitäten resultierenden Versickerungsraten bei einem gering bis mäßig kolmatierten sowie einem deutlich kolmatierten Belag (Einspülung von 200 g/m² bzw. 400 g/m² Quarzmehl in das Fugenmaterial); jeweils bei einem Oberflächengefälle von 2,5%. Für beide Kolmationsgrade wurde ein signifikanter Einfluss der Beregnungsintensität auf das Infiltrationsvermögen beobachtet. Die Infiltrationsrate nahm hierbei bei höheren Beregnungsintensitäten z.T. deutlich höhere Werte an als bei geringeren Intensitäten.

Für den gering bis mäßig kolmationsbeeinflussten Belag schwankte die Versickerungsrate zwischen rd. 80 l/(s·ha) und 140 l/(s·ha) bei Beregnungsintensitäten 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 Versuchspha-

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

se 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).

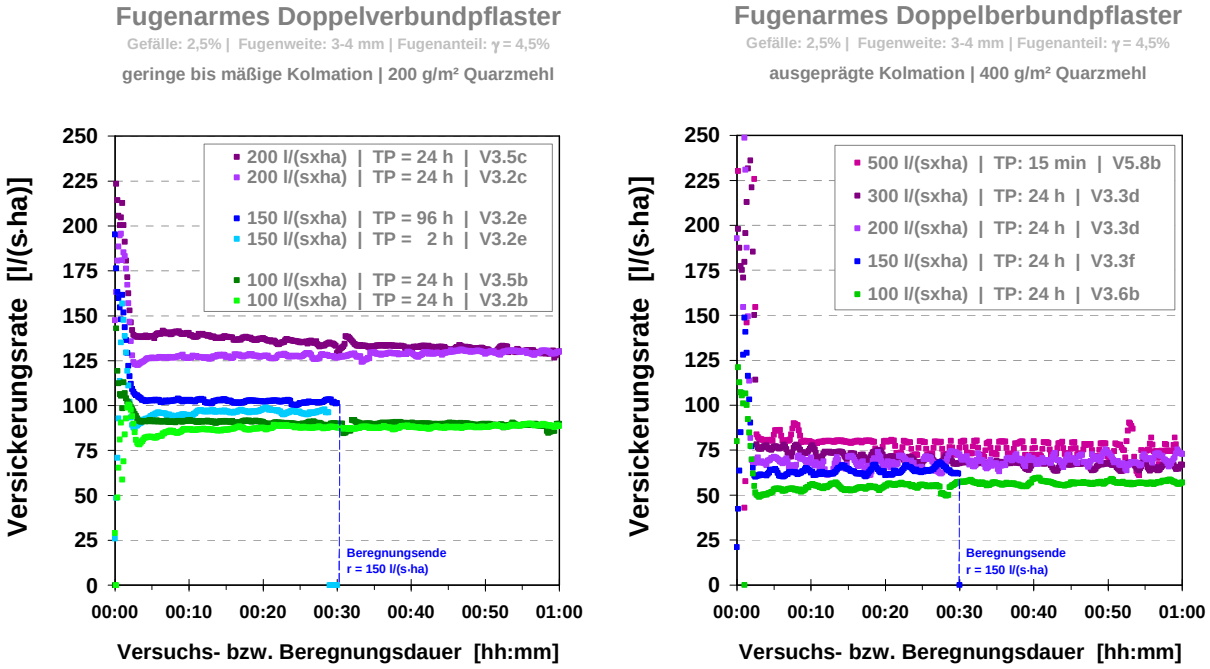


Abbildung 33: Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei mäßigem sowie bei ausgeprägtem Kolmationsgrad in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität (2,5% Gefälle)[97]

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.

97 TP: Dauer der Trockenperiode vor Beregnungsbeginn

Nichtsdestotrotz dokumentiert Abbildung 33, 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. $7 \cdot 10^{-4}$ m/s im Neuzustand sowie von $1 \cdot 10^{-4}$ 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. Gleichwohl kann in der Praxis bspw. aufgrund der Anlagerung von organischen Partikeln das Infiltrationsvermögen des Fugenmaterials durchaus noch weiter herabgesetzt sein.

Die Grafik links in Abbildung 33 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 ± 15 l/(s·ha), was einer relativen Schwankungsbreite von rd. 10% entspricht.

Der Einfluss des Oberflächengefälles auf das Versickerungsvermögen eines Doppelverbundpflasters wird in Abbildung 34 veranschaulicht. Die Grafik zeigt die gemessenen Versickerungsraten in Abhängigkeit von Beregnungsintensität, Kolmationsgrad und Gefälle am Beispiel einer Beregnungsdauer von 15 Minuten. Aufgrund der über die Versuchsdauer relativ konstanten Versickerungsraten ergibt sich für andere Dauerstufen ein ganz ähnliches Bild.

Im Neuzustand spielt das Oberflächengefälle bei den betrachteten Niederschlagsintensitäten von 100-200 l/(s·ha) keine Rolle, da das Infiltrationsvermögen deutlich höher ist. Bei geringem bis mäßigem Feinpartikeleintrag und entsprechend herabgesetztem Versickerungsvermögen wird dagegen ein nennenswerter Einfluss sichtbar. Während sich die Versickerungsraten für Neigungen von 2,5% und 5,0% zwar kaum unterscheiden, resultieren für den um 7,5% geneigten Belag um rd. 20 l/(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.

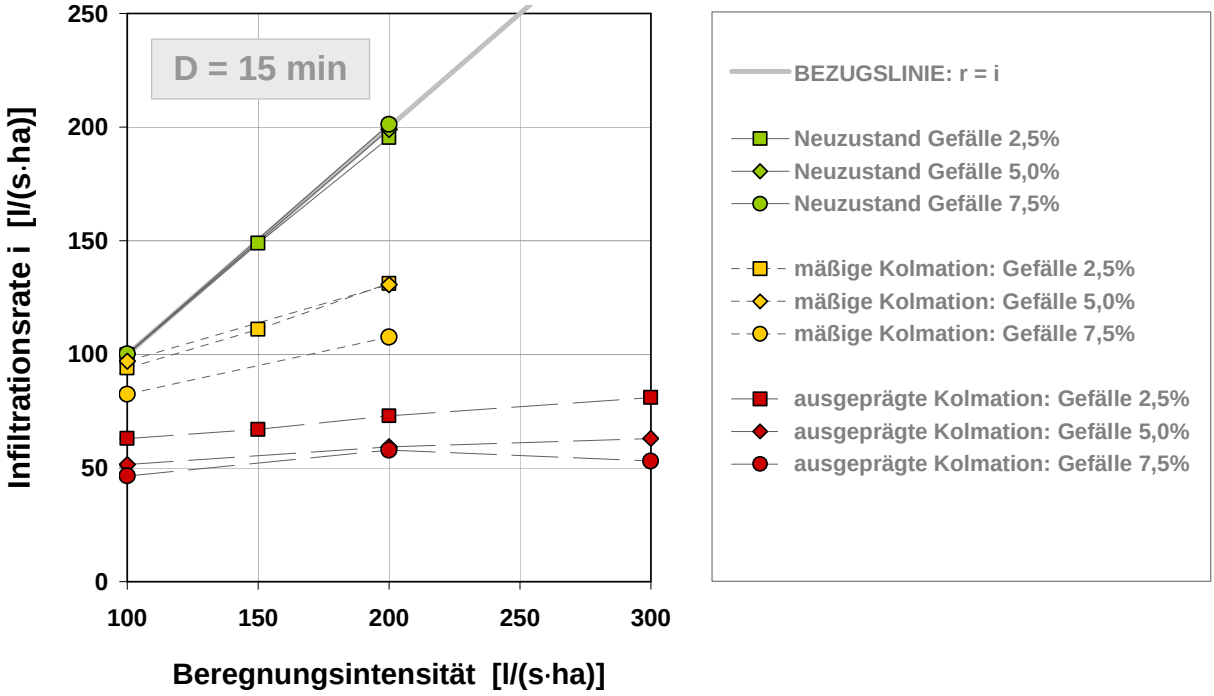


Abbildung 34: **Versickerungsraten eines fugenarmen Doppelverbundpflasters in Abhängigkeit von Beregnungsintensität, Kolmationsgrad und Gefälle (D = 15 min)**

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.

Abbildung 34 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. Dies zeigt sich besonders an einem Beregnungsversuch mit variabler Beregnungsintensität, der für den Belag aus fugenarmem Doppelverbundpflaster bei einer aufgetragenen Quarzmehlmenge von 400 g/m² durchgeführt worden ist.

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.[98] Der Beregnungsverlauf ist zusammen mit den resultierenden Ganglinien des Oberflächenabflusses und der Infiltrationsrate in Abbildung 35 dargestellt.

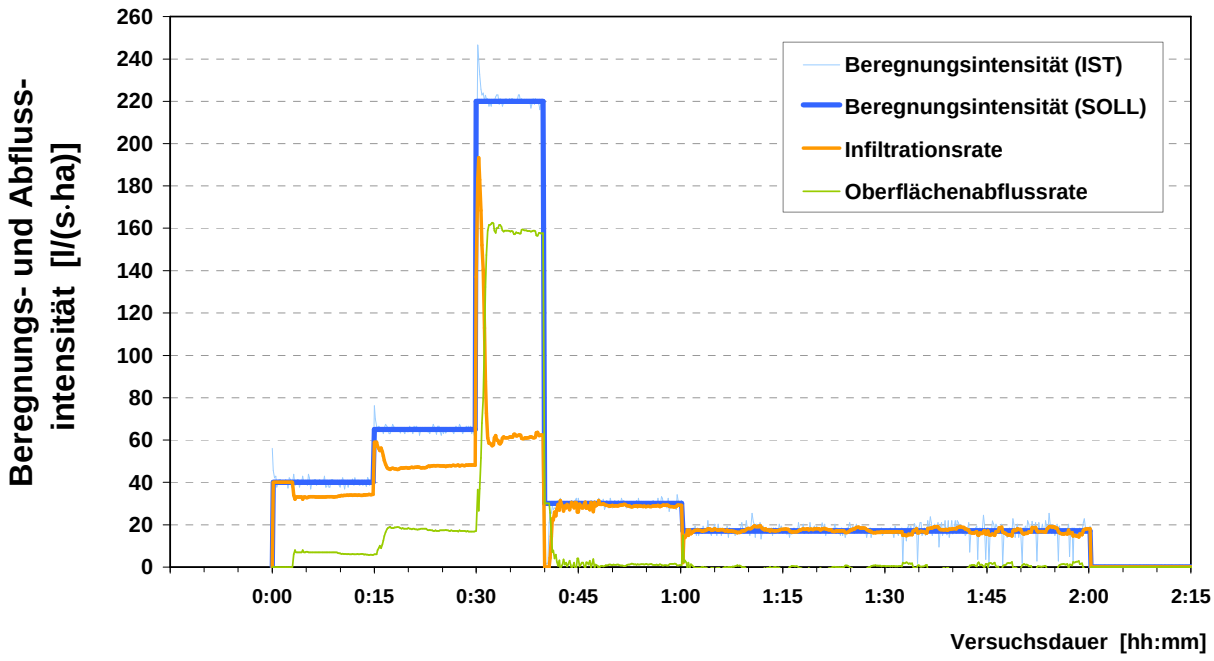


Abbildung 35: **Messwertdarstellung für einen Laborversuch mit intensitätsvariabler Beregnung an einem Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle und ausgeprägtem Kolmationsgrad**

98 DWD (2005)

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 Beregnungsintensitäten Versickerungsraten von 50-80 l/(s·ha) ermittelt wurden. Hier stellte sich jedoch eine Infiltrationsrate von lediglich rd. 34 l/(s·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.

Die Versuchsergebnisse bekräftigen und belegen die o.g. These, dass zwischen dem momentanen Versickerungsvermögen einer Pflasterfläche und der aktuellen Niederschlagsintensität ein signifikanter Zusammenhang besteht. Die Infiltrationsrate steigt dabei proportional zur Beregnungsintensität in durchaus nennenswertem Maße an. Über die Ursache dieses Phänomens kann dagegen 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.[99] 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.

[99] Flöter, O. (2006), S. 117

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 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. 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.

So ergeben sich während eines Regenereignisses 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 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 Infiltrometer-

messungen belegt werden. Hierzu wären weitergehende Untersuchungen zum expliziten Wasserhaushalt des Fugenmaterials auf kleiner Skala erforderlich.

Für den Pflasterbelag aus Doppelverbundsteinen wurde dagegen 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.[100] Andererseits fanden bspw. Schramm und Münchow[101] in ihrer Untersuchung z.T. auch erhöhte Versickerungsleistungen bei vorgenässten Pflasterbelägen. Generell sind hier zwei konkurrierende Prozesse wirksam. 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 ≥ 24 Stunden.

Die Ergebnisse der Wassergehaltsmessung sowie die ermittelten Infiltrationsraten sind für den mit 400 g/m² Quarzmehl beaufschlagten Belag in Abbildung 36 für zwei Zeitskalen dargestellt.

Innerhalb von wenigen Minuten nach Einsetzen des ersten Beregnungsintervalls, nach zuvor gehender 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 lediglich 6%. Innerhalb der nächsten 25 Minuten steigt er auch lediglich auf 14% an. Die Beregnungshöhe von 27 mm bzw. die davon in den Oberbau

---

100 z.B. Nolting, B. et al. (2005)

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

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.

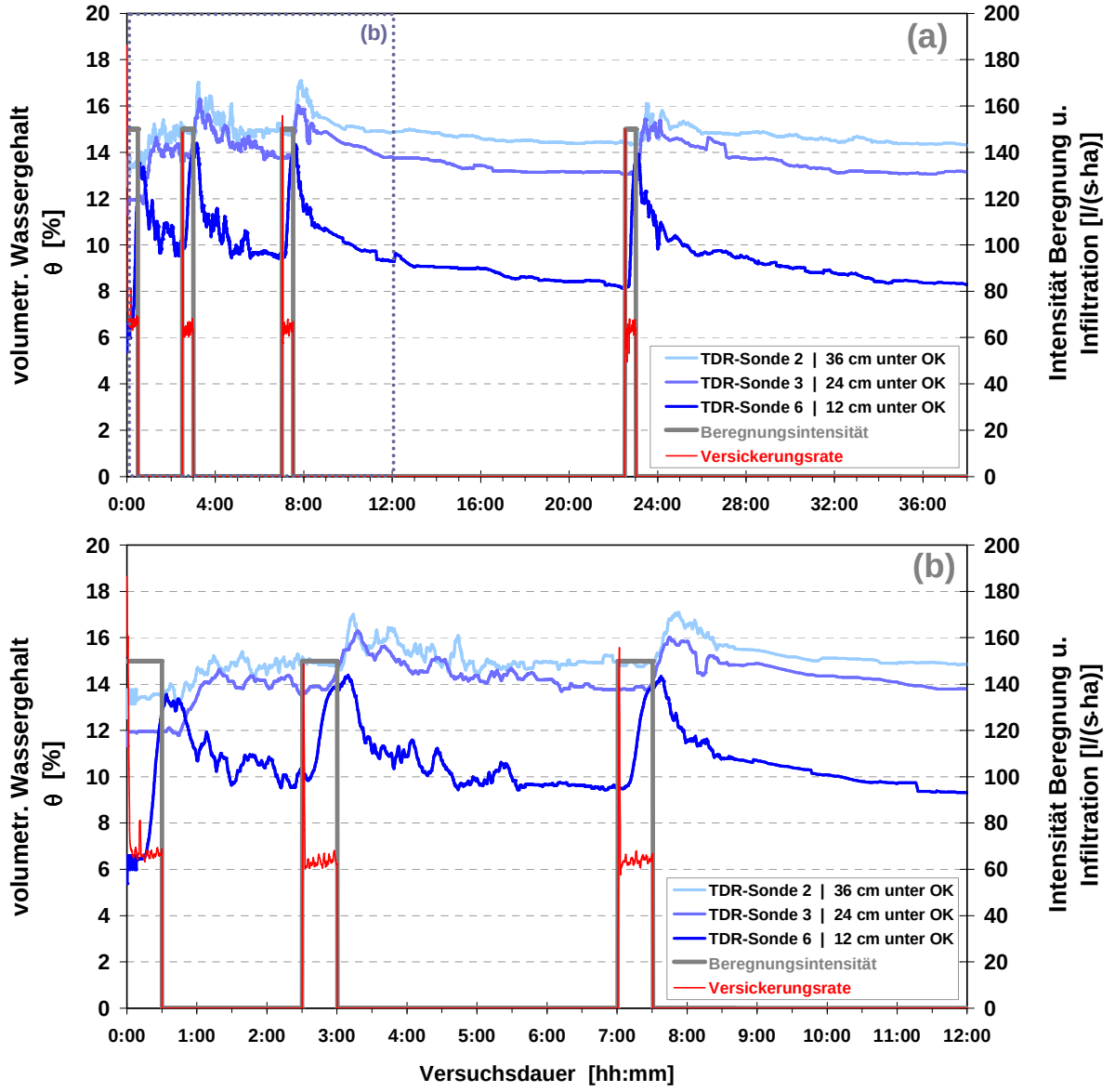


Abbildung 36: **Messergebnisse der Versickerungsrate und des Wassergehaltes bei intermittierender Beregnung an einem Doppelverbundpflaster mit 2,5% Gefälle bei ausgeprägter Kolmation (400 g/m² Quarzmehl)**

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.

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 er Tragschicht) ist davon auszugehen, dass nur bei intensitätsstarken 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. Dieser Sachverhalt ist auch in Abbildung 37 veranschaulicht. Die Versickerungsraten sind hier als Mittelwerte über das jeweilige Beregnungsintervall angegeben.

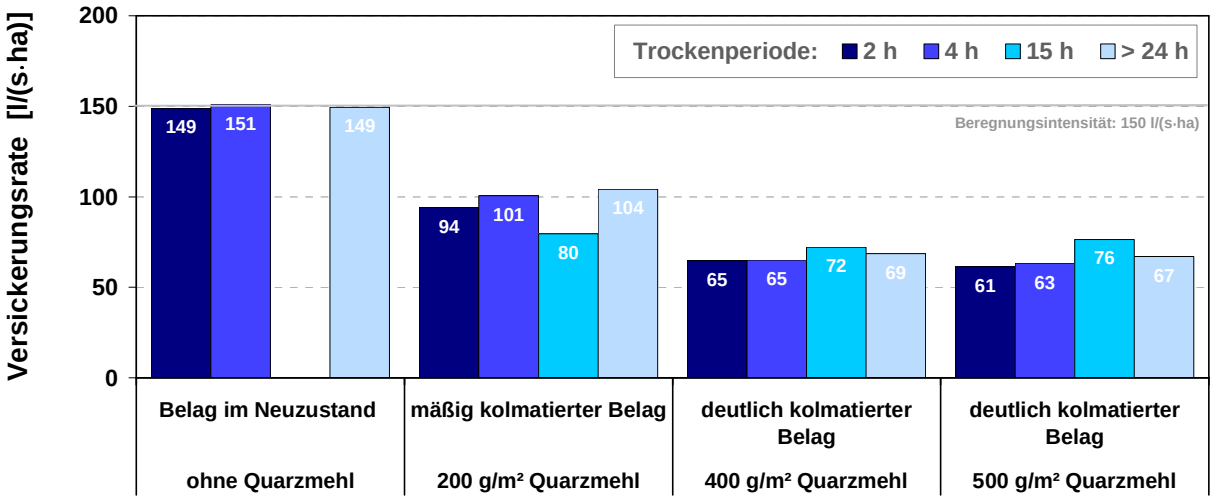


Abbildung 37: Versickerungsraten in Abhängigkeit von der vorangegangenen Trockenperiode bei unterschiedlichen Kolmationsgraden (fugenarmes Doppelverbundpflaster)

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 für die beiden Beläge mit mäßigem und mit ausgeprägtem Kolmationsgrad in Abbildung 38 und Abbildung 39 nochmals im Detail 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.

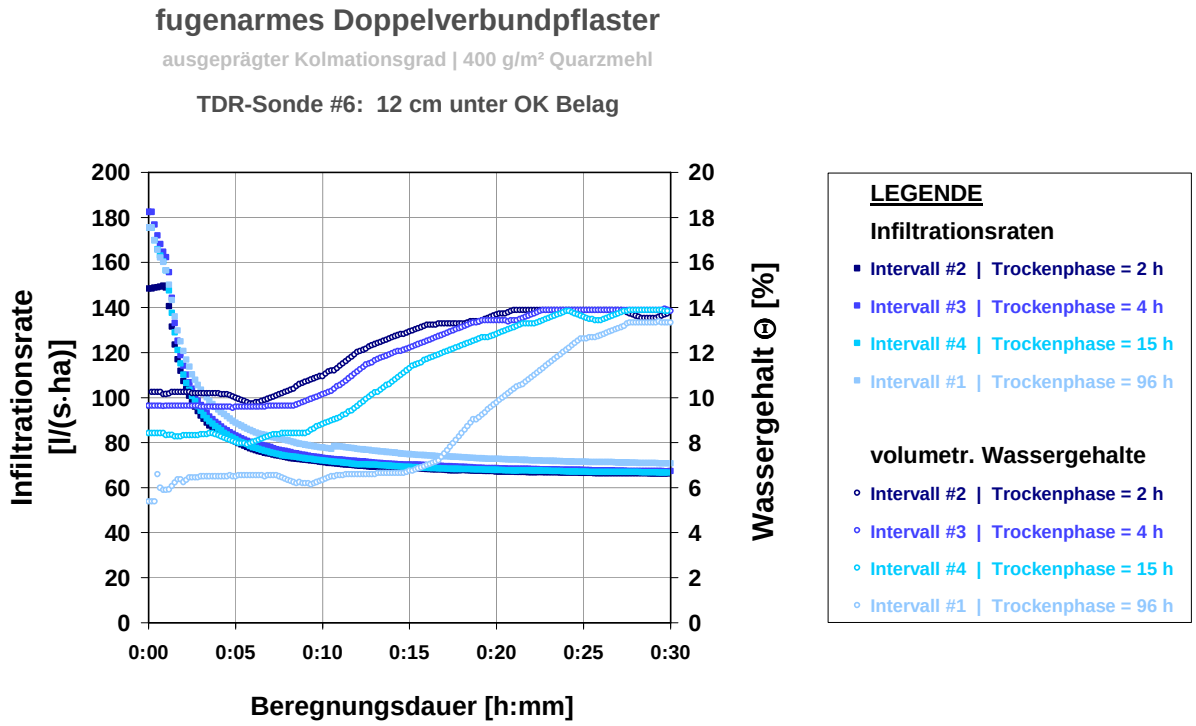


Abbildung 38: Zusammenhang zwischen der Versickerungsrate und dem Wassergehalt in den oberen Tragschichthorizonten bei einem Doppelverbundpflaster-belag mit ausgeprägtem Kolmationsgrad

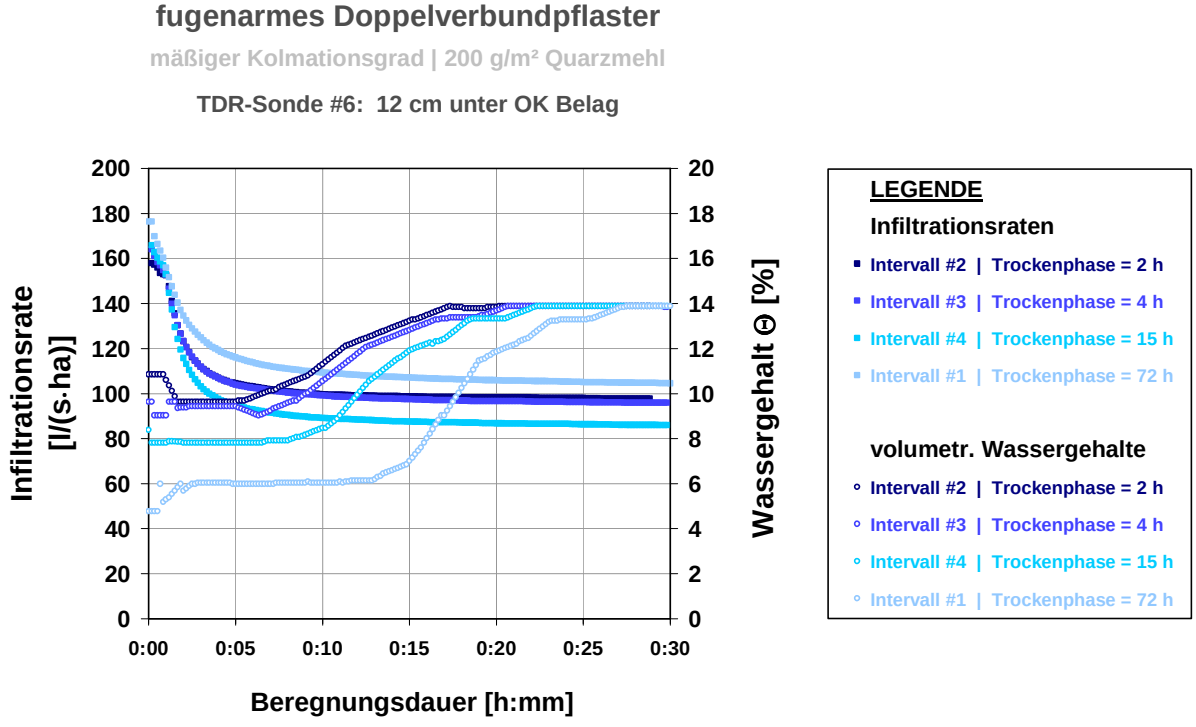


Abbildung 39: Zusammenhang zwischen der Versickerungsrate und dem Wassergehalt in den oberen Tragschichthorizonten bei einem Doppelverbundpflaster-belag mit mäßigem Kolmationsgrad

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 dabei 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 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 von den in nachstehender Abbildung 40 dargestellten Korrelationskurven.

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 Doppelverbundstei-

nen aufgetragen. Eine signifikante Korrelation zwischen den beiden Größen ist dabei nicht zu erkennen.[102]

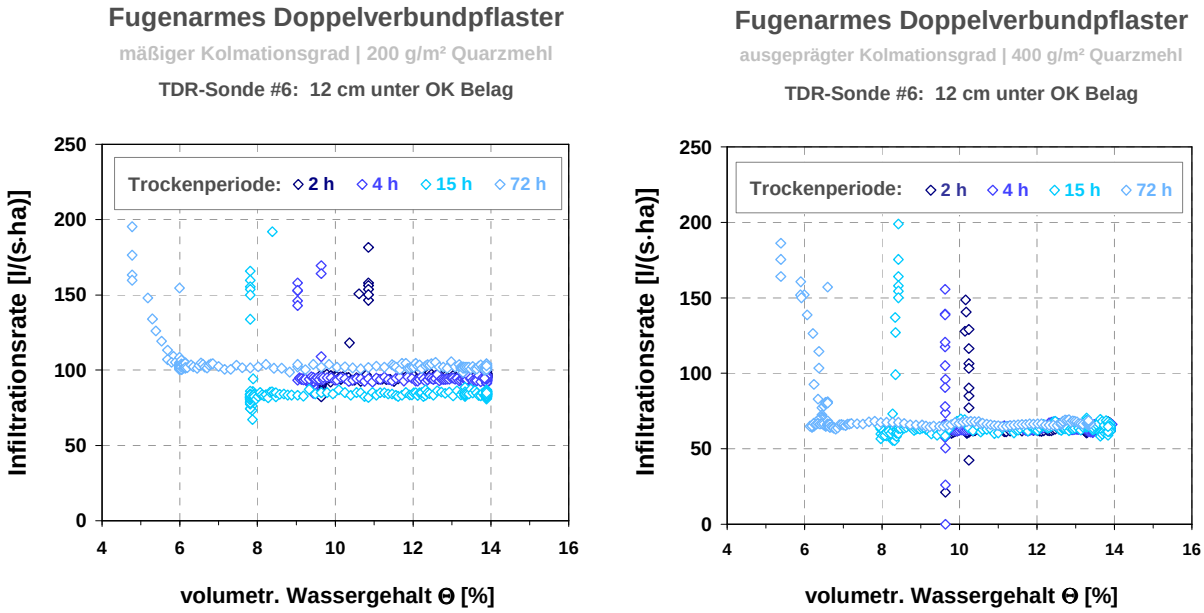


Abbildung 40: Korrelationen zwischen Infiltrationsrate und Wassergehalt in der Tragschicht für einen Doppelverbundpflasterbelag

Neben der Analyse der Abflussbildungs- und Versickerungsprozesse wurden aus den Messergebnissen der Beregnungsversuche Abflussbeiwerte abgeleitet. Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen die Spitzenabflussbeiwerte, die sich für fugenarmes Doppelverbundpflaster in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität und des Kolmationsgrades für unterschiedliche Dauerstufen ergeben haben.

Der Abflussbeiwert nimmt i.d.R. 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.

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, Abflussbei-

[102] 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.

werte stets in Bezug zu einer expliziten Niederschlagsbelastung zu sehen und zu verwenden.

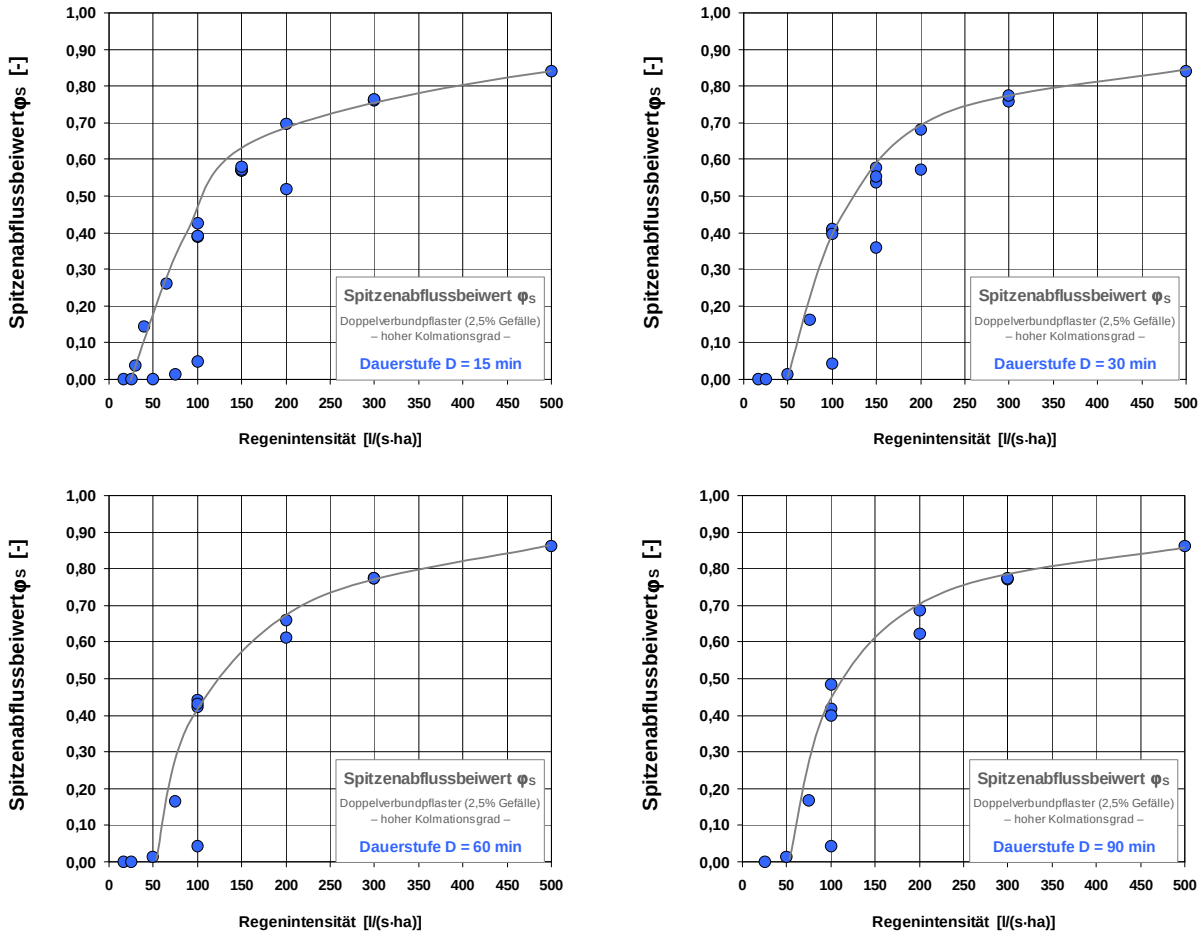


Abbildung 41: Abflussbeiwerte eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei 2,5% Gefälle und ausgeprägtem Kolmationsgrad für verschiedene Dauerstufen

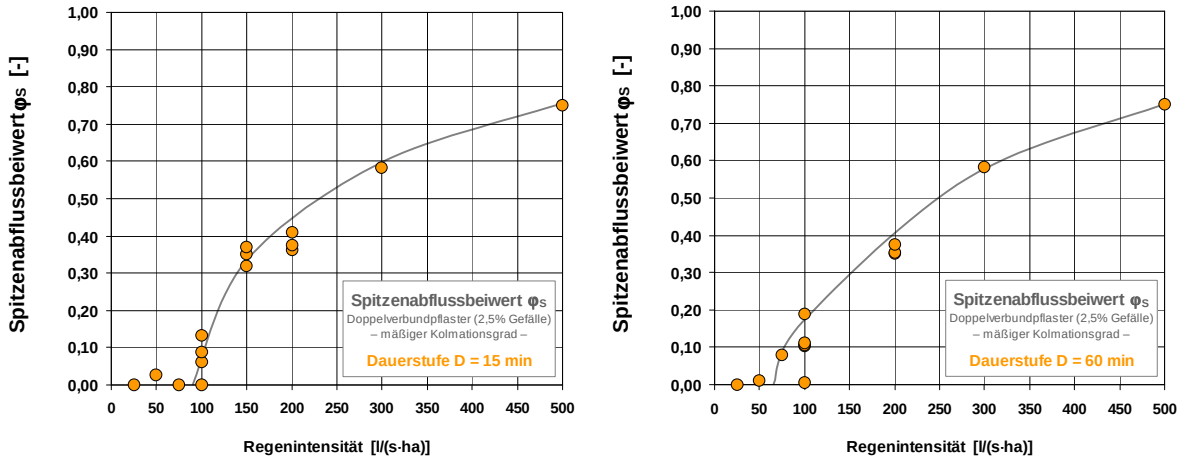


Abbildung 42: Abflussbeiwerte eines fugenarmen Doppelverbundpflasters bei 2,5% Gefälle und mäßigem Kolmationsgrad für verschiedene Dauerstufen

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. Ausgewählte Messergebnisse für beide Bauweisen (Versuchsserien 5.8 und 5.9) sind in Abbildung 43 einander gegenübergestellt.

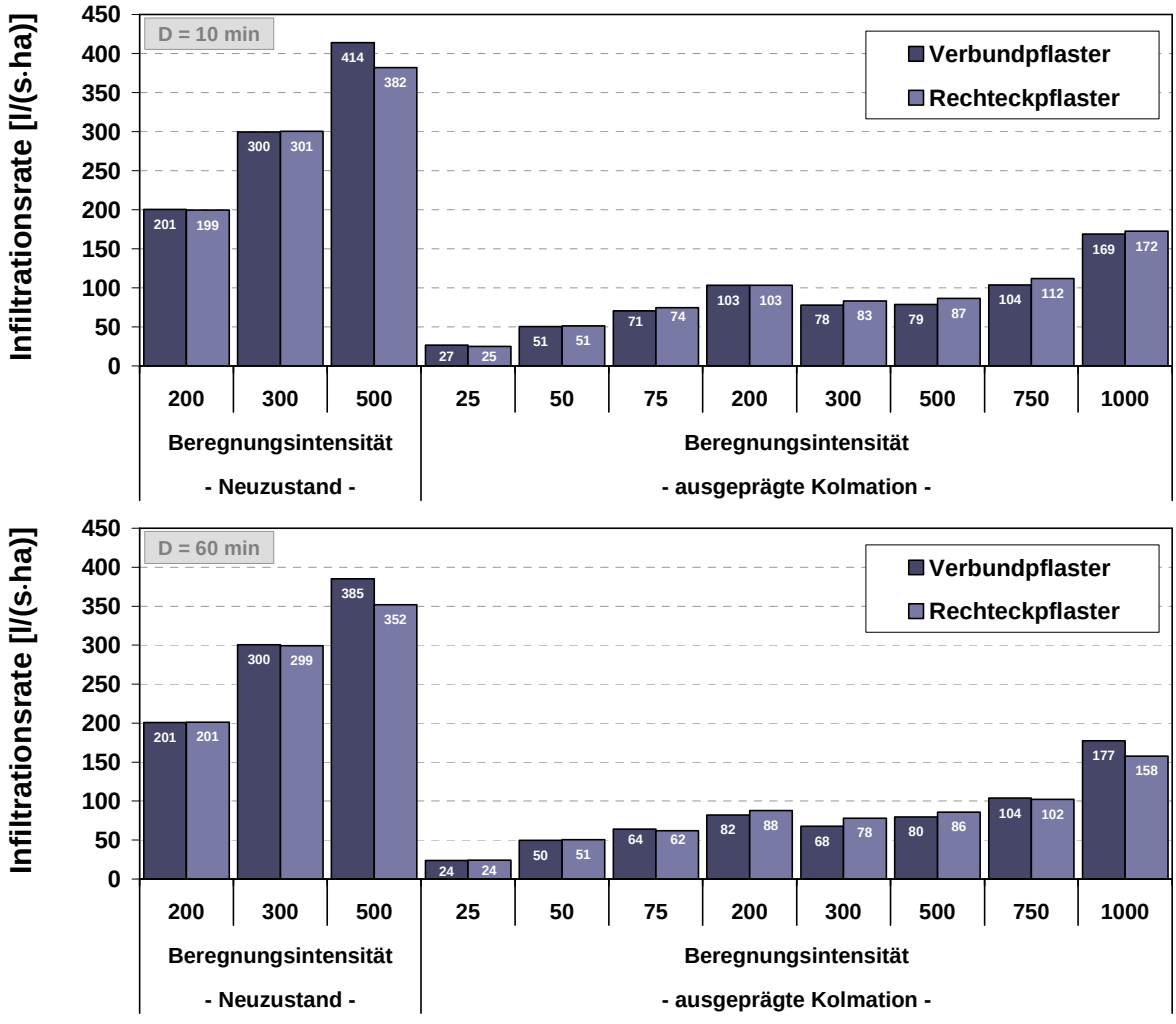


Abbildung 43: Gegenüberstellung der Infiltrationsraten von Doppelverbund- und Rechteckpflaster für verschiedene Beregnungsintensitäten, Kolmationsgraden und Dauerstufen (Gefälle 2,5%)

Beide Pflasterungen weisen ganz ähnliche Fugenanteile auf, die bei Fugenweiten von 3-4 mm jeweils in der Größenordnung von 4-5% liegen. Als Fugenfüllmaterial wurde für beide Pflasterdeckungen gewaschener Sand verwendet. Das Rechteckpflaster war im Fischgrätverband verlegt.

Wie Abbildung 43 zeigt, wurden sowohl im Neuzustand als auch im Gebrauchszustand[103] 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 44 an dem wellenförmigen Verlauf der Infiltrationsrate.

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 44 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 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

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

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.

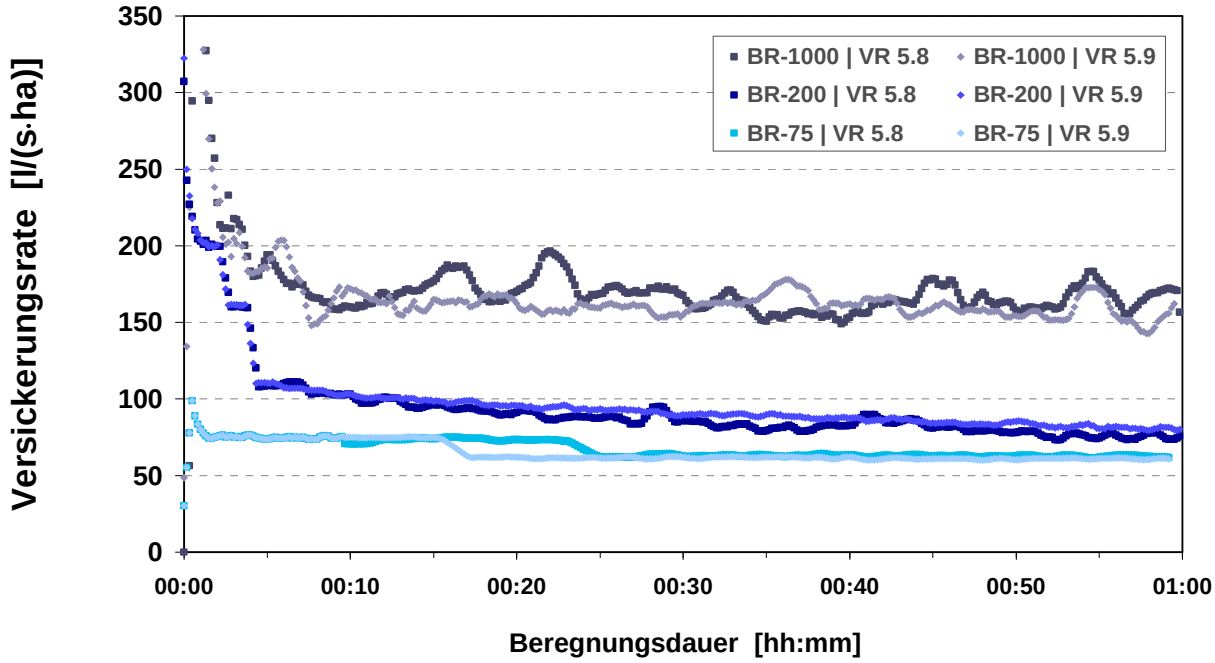


Abbildung 44: **Infiltrationsganglinien von fugenarmen Doppelverbund- und Rechteckpflasterbelägen für Beregnungsversuche mit 75 l/(s·ha), 200 l/(s·ha) und 1000 l/(s·ha) bei einem Gefälle 2,5%**[104]

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

104 VR 5.8: Doppelverbundpflaster; VR 5.9: Rechteckpflaster

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 30 und Abbildung 31). 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.

Die unterschiedliche Form der Pflastersteine sowie die Unterschiede im Fugenbild scheinen ebenfalls keinen Einfluss auf das Versickerungsvermögen zu haben, solange das Fugenmaterial und der Fugenanteil nahezu gleich sind. Es wird daher davon ausgegangen, dass sich das Abfluss- und Versickerungsverhalten beider hier untersuchter Pflasterbauweisen auch bei anderem als dem hier betrachteten Oberflächengefälle von 2,5% nicht wesentlich verändert.

4.2.2 Fugenarm verlegte Plattenbeläge

Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurden drei verschiedene Plattenbeläge betrachtet, die sich durch die Abmessungen der Betonplatten unterscheiden. Untersucht wurden quadratische Platten mit Seitenlängen von 30 cm, 40 cm und 50 cm, die mit einer Fugenweite von jeweils 3-4 mm in Sand verlegt waren (Abbildung 45). Aufgrund der unterschiedlichen Plattenformate weisen die Beläge differierende Fugenanteile von 0,6%, 1,2% sowie 1,8% auf.



Abbildung 45: 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.

Der prinzipielle Aufbau der untersuchten Plattenbeläge in der Lysimeteranlage ist in Abbildung 46 veranschaulicht. Eine Detailübersicht der durchgeführten Versuche befindet sich im Anhang (Versuchsmatrix Serie 7).

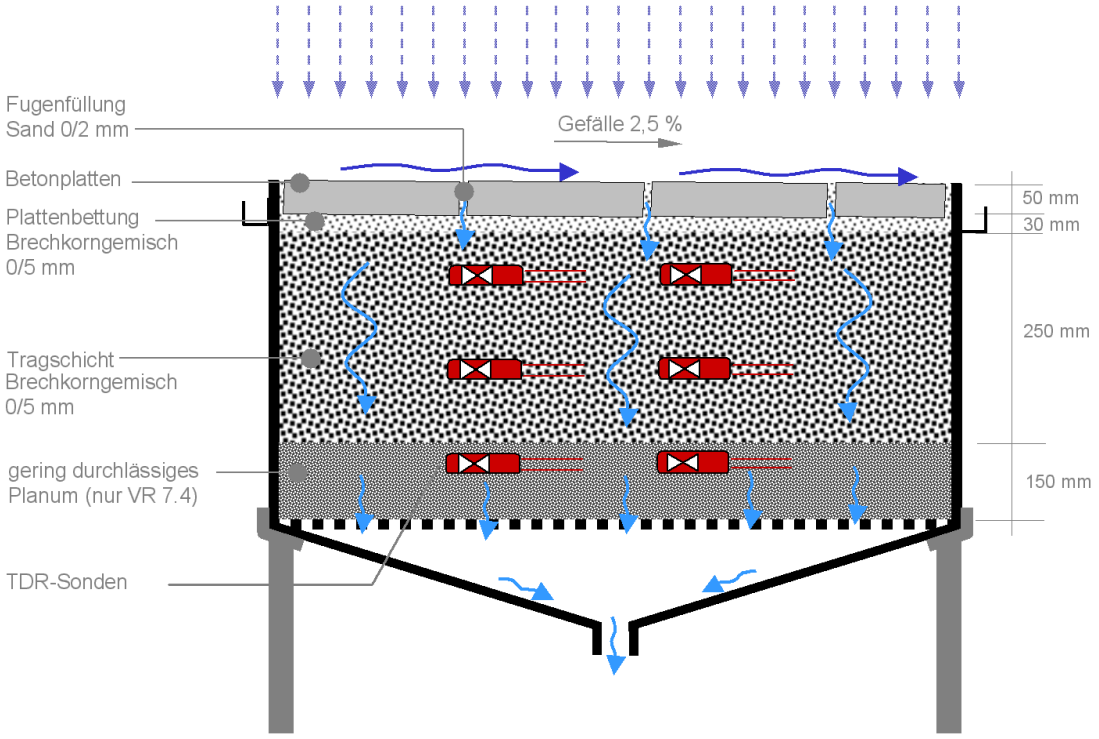


Abbildung 46: Aufbau der untersuchten Plattenbeläge (Schemaskizze)

Bei den Versuchen bei 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 47, für den Gebrauchszustand in Abbildung 48 dargestellt.

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.

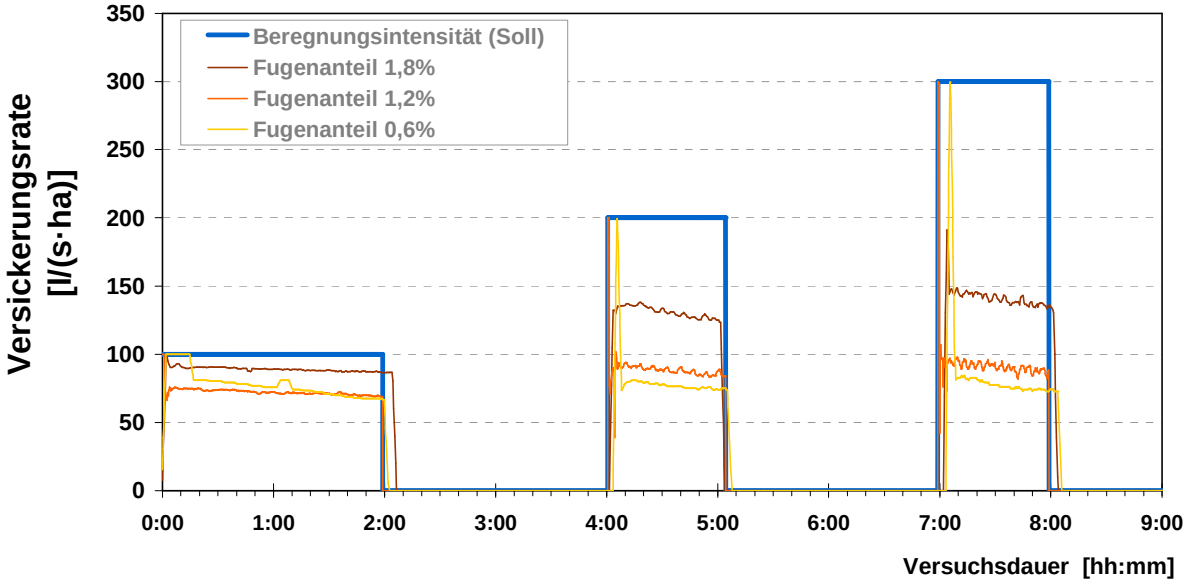


Abbildung 47: **Infiltrationsverläufe der untersuchten Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten im Neuzustand (Gefälle 2,5%)**

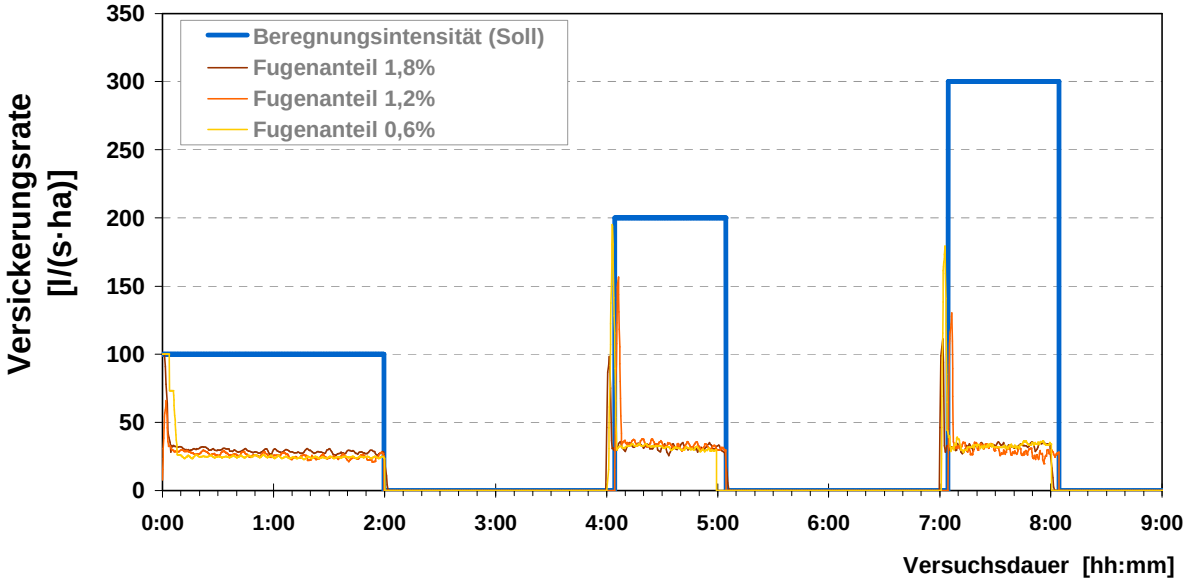


Abbildung 48: **Infiltrationsverläufe der untersuchten Flächenbeläge aus fugenarm verlegten Gehwegplatten im Gebrauchszustand (Gefälle 2,5%)**

Im Gegensatz zum Neuzustand wirkt sich der Fugenanteil im Gebrauchszustand nicht nennenswert auf das Infiltrationsvermögen aus. Hier liegen die beobachteten Versickerungsraten aller drei Plattenbeläge auf gleichem Niveau. Darüber hinaus ist auch kein nennenswerter Anstieg der Infiltrationsleistung bei steigender Beregnungsintensität zu verzeichnen, zumindest nicht bezogen auf die Absolutwerte der Versickerungsrate. Prozentual gesehen ergeben sich aufgrund der insgesamt auf niedrigem Niveau liegenden Infiltrationsraten Steigerungen von bis zu 20%. Die Veränderung der Infiltrationsrate über die Beregnungsdauer ist ebenfalls relativ gering. Für alle drei Plattenformate ergibt sich für die betrachte-

ten 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.

Bezüglich des Versickerungsvermögens von Plattenbelägen sind in der Fachliteratur bislang kaum Messwerte an Bestandsflächen genannt. Zudem konnten im Rahmen der eigenen Infiltrometermessungen keine Plattenbeläge untersucht 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 Münchow[105] 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. Eine vereinfachte Infiltrationsmessung, die im Rahmen einer Studienarbeit an der TU Kaiserslautern durchgeführt wurde, ergab für Plattenbeläge im Gebrauchszustand Infiltrationsraten im Bereich von 25-50 l/(s·ha). In Bereichen mit augenscheinlich geringeren Kolmationsgraden oder mit erweiterten Fugenabständen infolge von Lageveränderungen der Betonplatten wurden dabei deutlich höhere Versickerungsleistungen registriert.[106]

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 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 in Abbildung 49 und Abbildung 50 nochmals am Beispiel einer Dauerstufe von 30 Minuten grafisch herausgearbeitet.

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

106 Biwer, C. (2007)

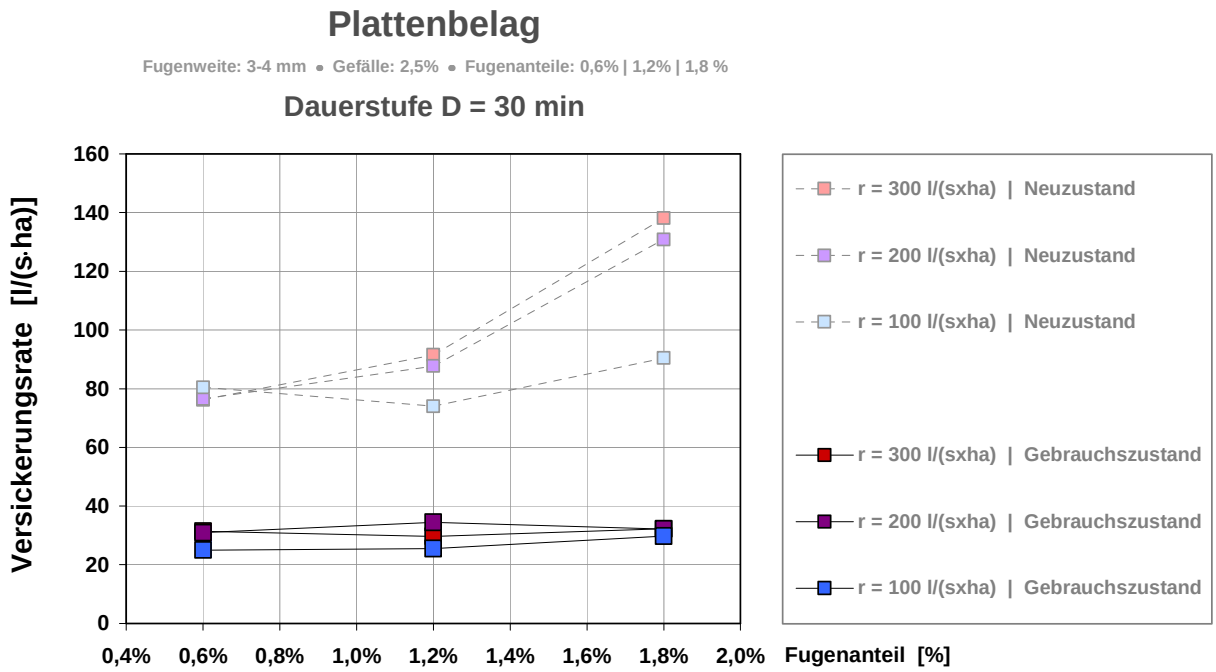


Abbildung 49: **Versickerungsraten fugenarmer Plattenbeläge in Abhängigkeit vom Fugenanteil (D = 30 min)**

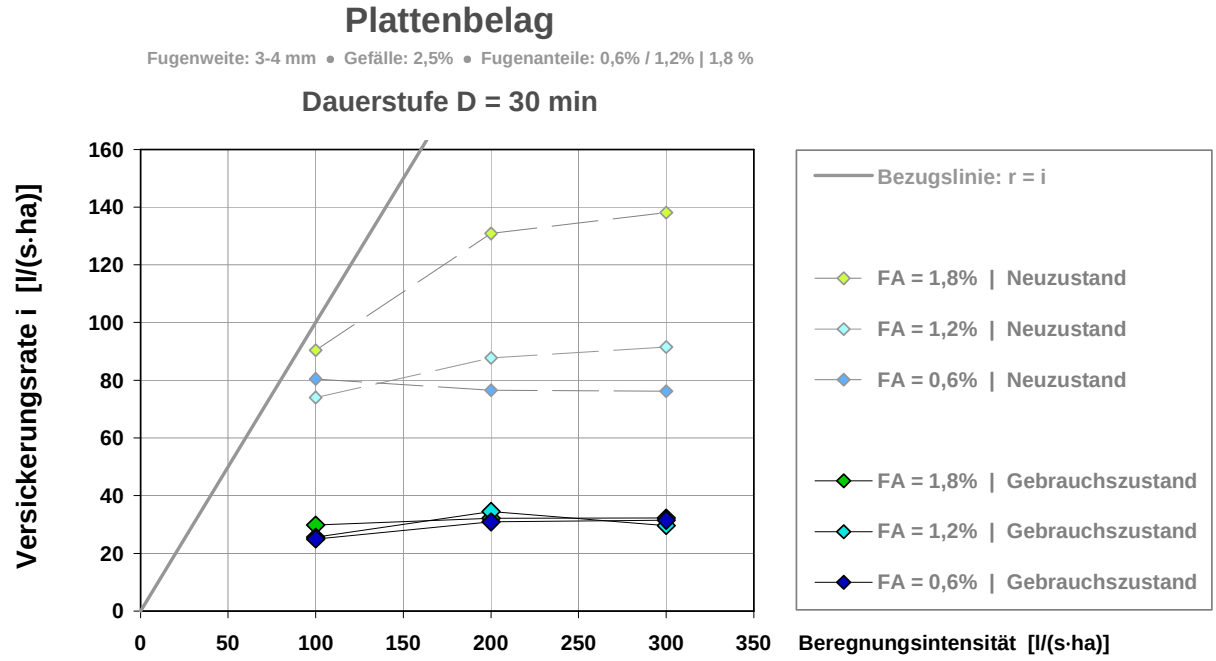


Abbildung 50: **Versickerungsraten fugenarmer Plattenbeläge in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität**

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).[107]

Für den Versuchszyklus an dem Plattenaufbau 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.[108] 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. Eine Wiederholung des Versuches konnte aus zeitlichen Gründen nicht mehr vollzogen werden.

Dennoch – oder gerade deshalb – lieferte der Versuch interessante Ergebnisse und wertvolle Erkenntnisse, wie die Gegenüberstellung der Messergebnisse in Abbildung 51 zeigt.

In der Abbildung sind Infiltrationsraten und Wassergehalte dargestellt, die aus den Beregnungsversuchen an dem Plattenbelag mit einem Fugenanteil von 1,8% (Plattenformat 30x30 cm) gewonnen wurden. 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).

---

[107] Die Sieblinie der beiden Materialmischungen sind im Anhang dargestellt.

[108] siehe Abbildung A - 20 und Abbildung A - 21 im Anhang

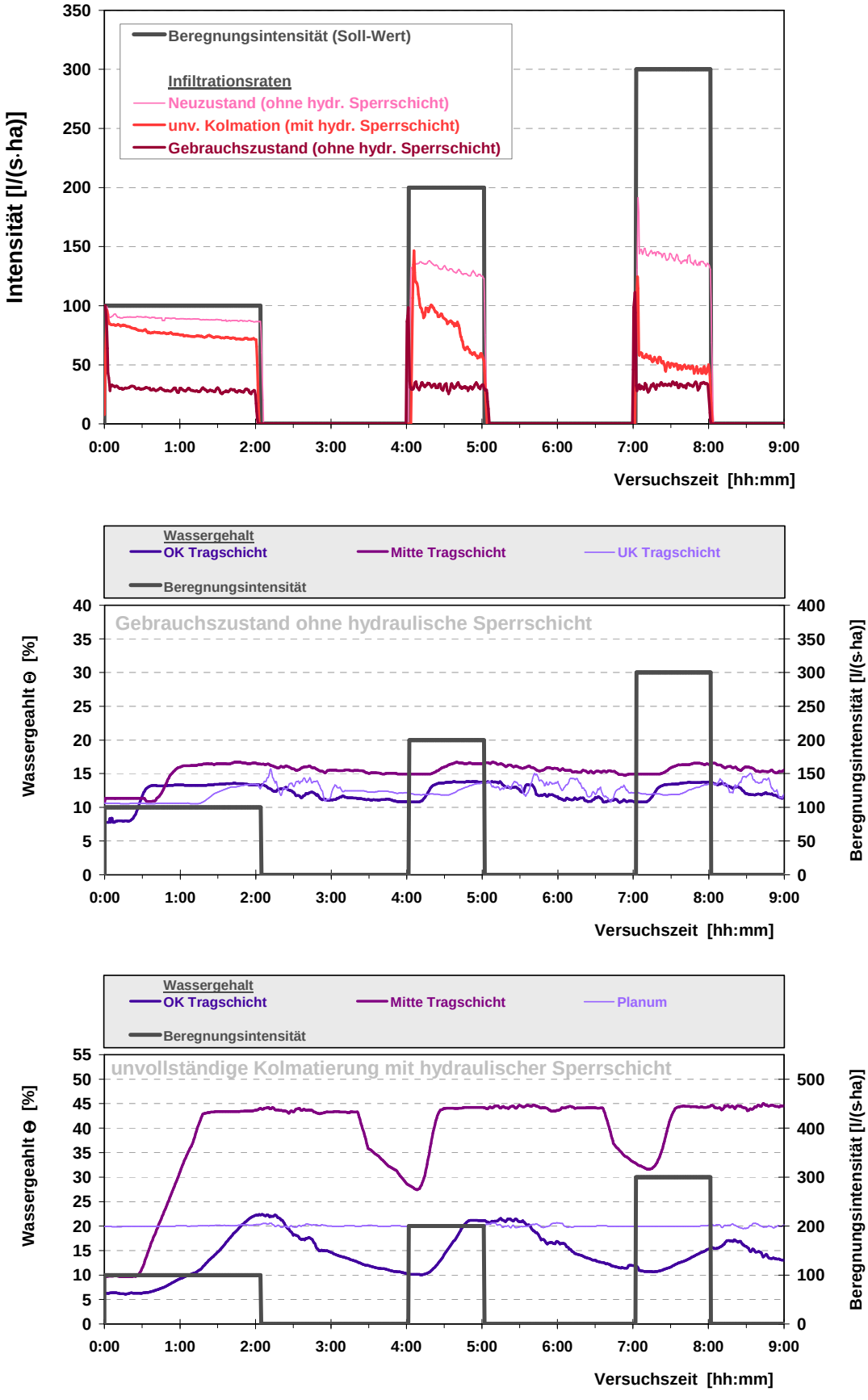


Abbildung 51: Messergebnisse an Plattenbelägen mit einem Fugenanteil von 1,8%

Für den Versuch im Gebrauchszustand mit homogener Tragschicht ergab sich nur ein mäßiger Anstieg des Wassergehaltes im Oberbau der Flächenkonstruktion (mittlere Grafik in Abbildung 51). 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.[109] Davon sind insgesamt 48 mm in den Oberbau des Plattenbelages infiltriert.[110] 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 Wasserhaushalt im Oberbau bei einer gering durchlässigen Unterlage dar (untere Grafik in Abbildung 51). Hier war der Wassergehalt in dem als hydraulische Sperrschicht wirkenden Planum zu Beginn der Beregnung bereits auf einem Niveau von 20% und änderte sich fortlaufend nicht. Dieser Anfangswassergehalt hatte sich bereits bei der Vorberegnung nach rd. einer Stunde eingestellt und dokumentiert den erreichten Sättigungszustand. Dabei konnte sich der Wassergehalt im Planum bis zum Beginn des ersten Beregnungsintervalls noch nicht reduzieren, da bis zu diesem Zeitpunkt noch ein Wasservolumen von rd. 25 mm im Flächenaufbau gespeichert war. 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 l/(s·ha) bzw. einem Durchlässigkeitsbeiwert von rd. $4 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Mit Einsetzen des ersten Beregnungsintervalls nahm daher 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

[109] Intervall 1: 72 mm; Intervall 2: 76 mm; Intervall 3: 109 mm

[110] Intervall 1: 21 mm; Intervall 2: 14 mm; Intervall 3: 13 mm

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. Dies zeigt sich daran, dass der Wassergehalt an der Oberkante der Tragschicht bereits rasch nach Ende der Beregnung absinkt. Der Sättigungszustand wurde dort im Übrigen nicht erreicht. 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 der reduzierten Infiltrationsrate 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 gleichen 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. Dabei wird unterstellt, dass eine Abnahme des hydraulischen Gradienten zwischen Oberkante und Unterkante der Tragschicht keinen Einfluss auf das Versickerungsvermögen des Deckbelages hat. Erst wenn die von unten ansteigende Sättigungsfront die Bettungsschicht erreicht hat, kann sich das als maßgeblich erachtete hydraulische Gefälle zwischen der Ober- und der Unterkante der Deckschicht so weit herabsetzen, dass auch die Infiltrationsrate zurückgeht. Bei einem vollständigen Einstau des Pflaster- oder Plattenaufbaus kann die Infiltrationsrate dann maximal den Wert der gesättigten Wasserleitfähigkeit des Planums annehmen.

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

tigkeit 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.[111]

Wie schon bei den untersuchten Pflasterbelägen aus fugenarm verlegten Betonsteinen wurden auch für die beprobten Plattenbeläge Abflussbeiwerte aus den Messdaten generiert. Exemplarisch sind die Spitzenabflussbeiwerte für die Plattenbeläge mit 1,8% und 0,6% Fugenanteil für die Dauerstufen D = 15 Minuten sowie D = 60 Minuten in den beiden nachstehenden Abbildungen dargestellt.

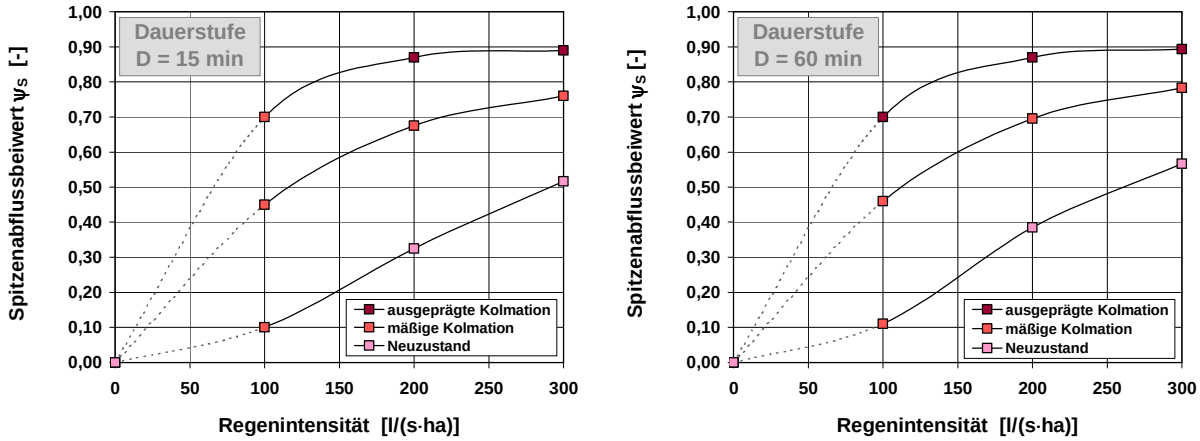


Abbildung 52: Abflussbeiwerte eines Plattenbelages mit einem Fugenanteil von 1,8% bei einem Gefälle von 2,5% in Abhängigkeit von Beregnungsintensität und Kolmationsgrad

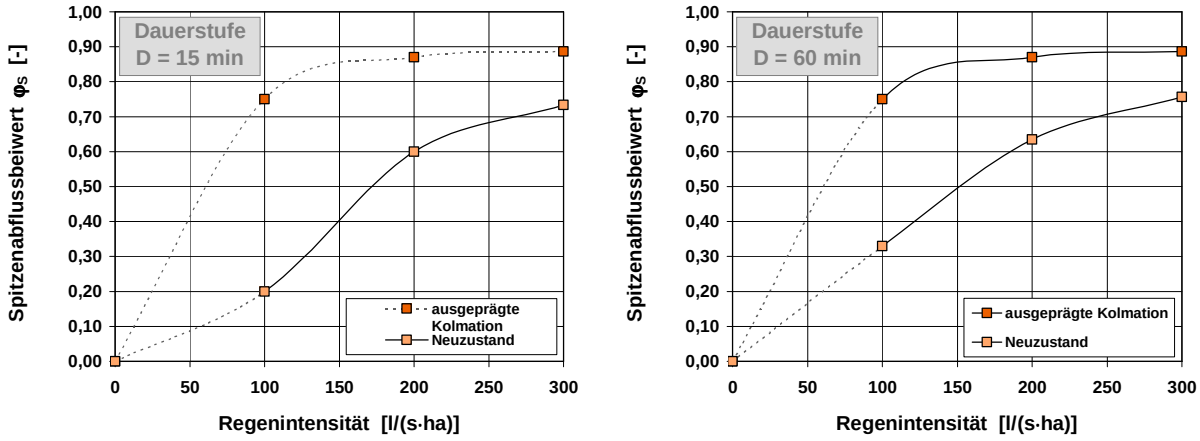


Abbildung 53: Abflussbeiwerte eines Plattenbelages mit einem Fugenanteil von 0,6% bei einem Gefälle von 2,5% in Abhängigkeit von Beregnungsintensität und Kolmationsgrad

111 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.

Die angegebenen Abflussbeiwerte repräsentieren die aus den Messdaten registrierten Oberflächenabflüsse für die drei betrachteten Beregnungsintensitäten von 100 l/(s·ha), 200 l/(s·ha) und 300 l/(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.

Die Grafiken verdeutlichen, dass der Abflussbeiwert – wie auch schon für die fugenarmen Pflasterbeläge festgestellt wurde – in einem erheblichen Wertbereich variieren kann. Je nach Kolmationsgrad und betrachteter Beregnungsintensität kann der Spitzenabflussbeiwert allein im Bereich des hier untersuchten Intensitätsspektrums bis 300 l/(s·ha) Werte zwischen 0,10 und 0,90 annehmen. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Dauerstufen sind dagegen wiederum insgesamt gering.

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.

4.2.3 Pflasterbeläge mit aufgeweiteten Sickerfugen

Die Laborversuche umfassten verschiedene Versuchsserien an zwei Pflasterbelägen, die mit weiteren, meist 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 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 (Pflasterde-

cke auf Bettungsschicht) untersucht wurden. Der prinzipielle Aufbau erfolgte dabei jeweils analog der zuvor geschilderten Pflaster- und Plattenbeläge (vgl. Abbildung 29 und Abbildung 46).



Abbildung 54: 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. Die Ergebnisse belegen somit, dass aufgeweitete und splittgefüllte Sickerfugen gegenüber schmaleren und sandgefüllten Fugen vergleichsweise unanfällig gegenüber dem Eintrag von Feinpartikeln sind. Im Detail sind die Ergebnisse dagegen weniger interessant. Nachfolgend werden daher nur einige wenige Ergebnisse exemplarisch dargestellt und diskutiert.

So zeigt Abbildung 55 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. Trotz der großen Menge an Quarzmehl konnte dadurch 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.

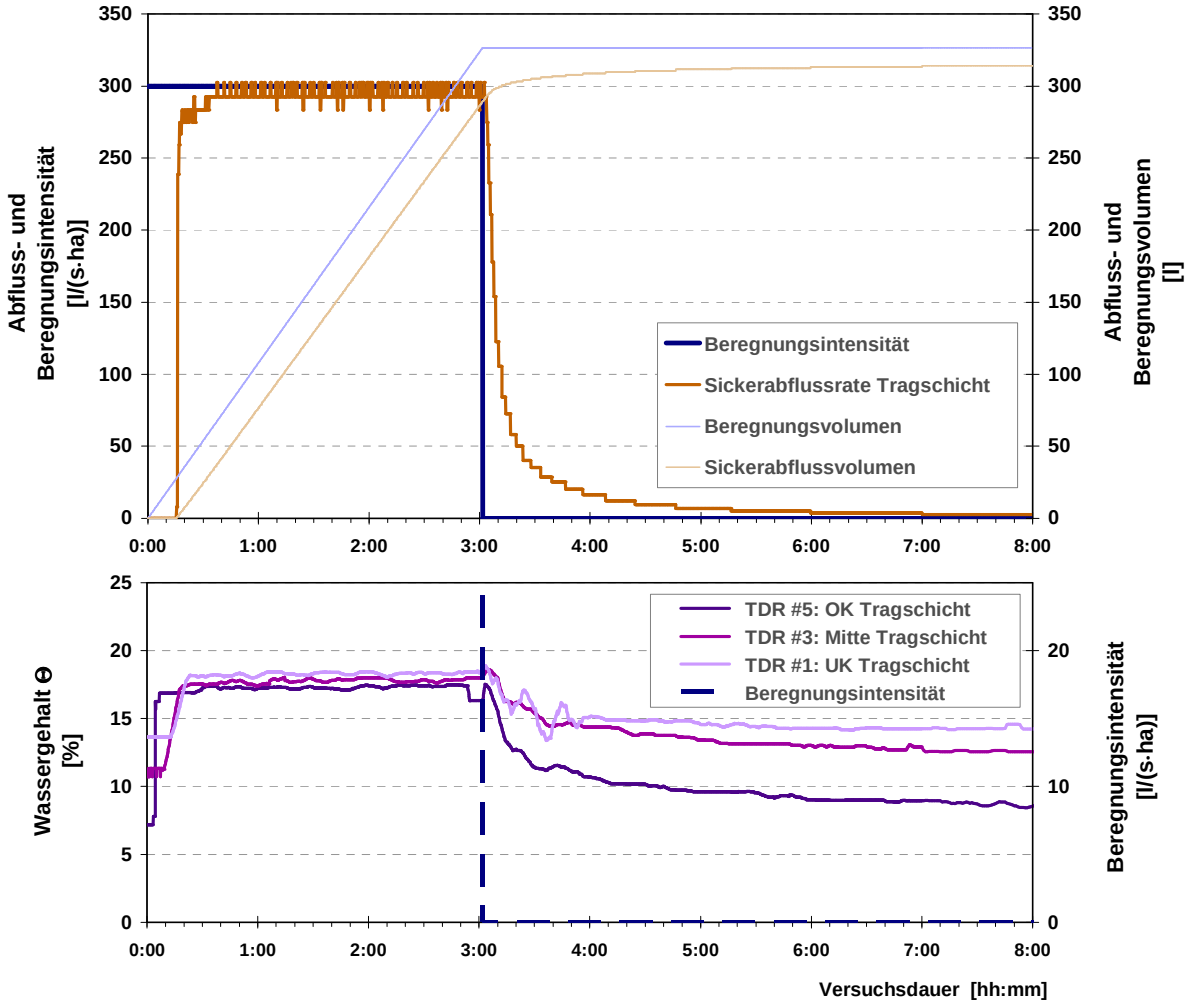


Abbildung 55: **Messergebnisse eines Pflasterbelages mit splittverfüllter Sickerfuge von 10 mm Breite bei einer Quarzmehlmenge 4000 g/m² (Gefälle 2,5%, Lagerung über 40 cm mächtiger Schottertragschicht)**

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 der Sickerabfluss aus der Tragschicht ein und stieg sofort sehr rasch an. Innerhalb von fünf Minuten wurden bereits Sickerabflussraten in der Größenordnung der Beregnungs- bzw. Infiltrationsrate erreicht; ein homogener Strömungszustand stellte sich bereits 35 Minuten nach Einsetzen der Beregnung ein.

Die zugehörigen Wassergehalte in verschiedenen Tragschichthorizonten sind ebenfalls in Abbildung 55 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. An der Oberkante der Tragschicht steigt der Wassergehalt nach nur drei Minuten an und erreicht nach rd. 10 Minuten sein Maximum, das bis zum Beregnungsende anhielt. An den TDR-Sonden in der Mitte sowie an der Unterkante der Tragschicht steigen die Wassergehalte nur kurze Zeit später an (10 min bzw. 15 min nach Beregnungsbeginn) und erreichen ihr Maximum ebenso rasch.

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

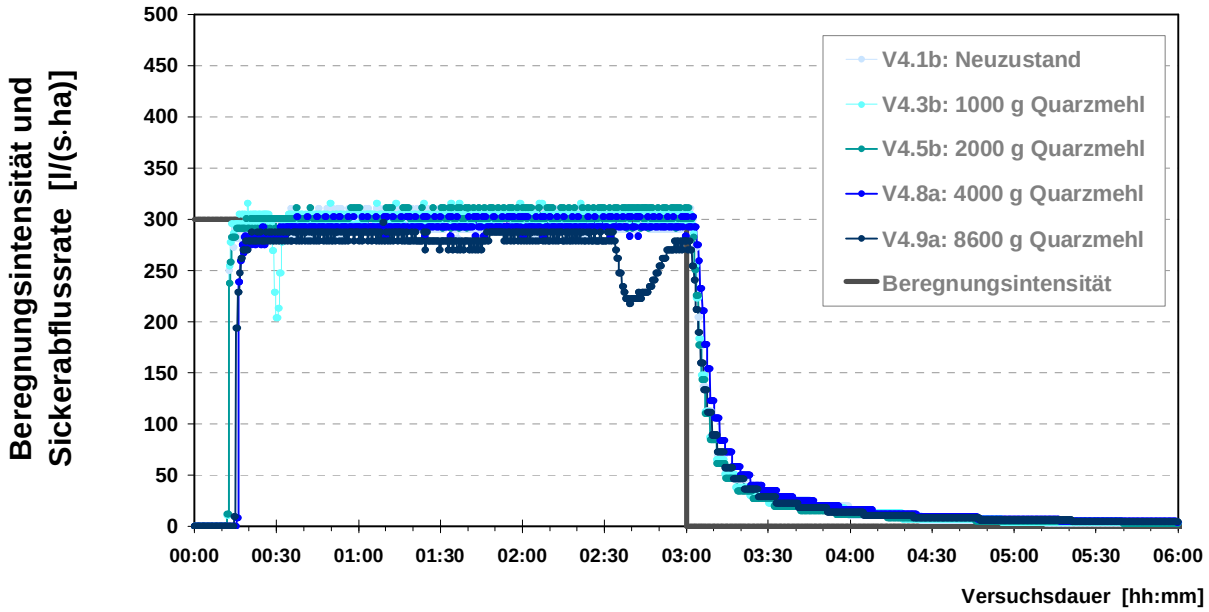


Abbildung 56: Sickerabflussraten eines Pflasterbelages mit splittverfüllter Sickerfuge von 10 mm Breite bei unterschiedlichen Quarzmehlmengen (Beregnungsintensität 300 l/(s·ha)

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 nennenswerte 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. Ein Versickerungsvermögen von deutlich über 500 l/(s·ha) wird jedoch in den meisten Fällen auch nach mehrjähriger Nutzung noch erreicht. Dies haben sowohl die exemplarischen Infiltrometermessungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes als auch die umfangreicheren Messungen der FH Bochum[112] belegt. Wie häufig und unter welchen Randbedingungen eine massive Kolmation dieses ansonsten hoch durchlässigen Pflastertyps in der Praxis vorkommt, kann bislang nicht quantifiziert werden. Die Beprobung des Versickerungsvermögens durch die FH Bochum ergab jedoch lediglich in vier von insgesamt 15 Messungen eine Infiltrationsrate, die nach 30 Minuten unter 500 l/(s·ha) lag (entspr. rd. 25%).[113] Die vorliegende Datenbasis reicht aber sicherlich noch nicht aus, um fundierte statistische Kennwerte daraus ableiten zu können.

Für die Pflasterbeläge in singulärer Anordnung ohne Tragschicht, lediglich auf einer dünnen Bettungsschicht liegend, ergaben sich Infiltrationsraten, die sich nicht nennenswert von den Ergebnissen bei regulärer angeordneter Tragschicht unterscheiden. Aufgrund der hohen Durchlässigkeit des Fugenmaterials ergaben sich darüber hinaus kaum Unterschiede zwischen den Belägen mit 7 mm und mit 10 mm Fugenweite (Fugenanteile 10% bzw. 14%). Dies ist in Abbildung 57 veranschaulicht.

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.

---

112 Nolting et al. (2005)

113 siehe Abbildung A - 6 im Anhang

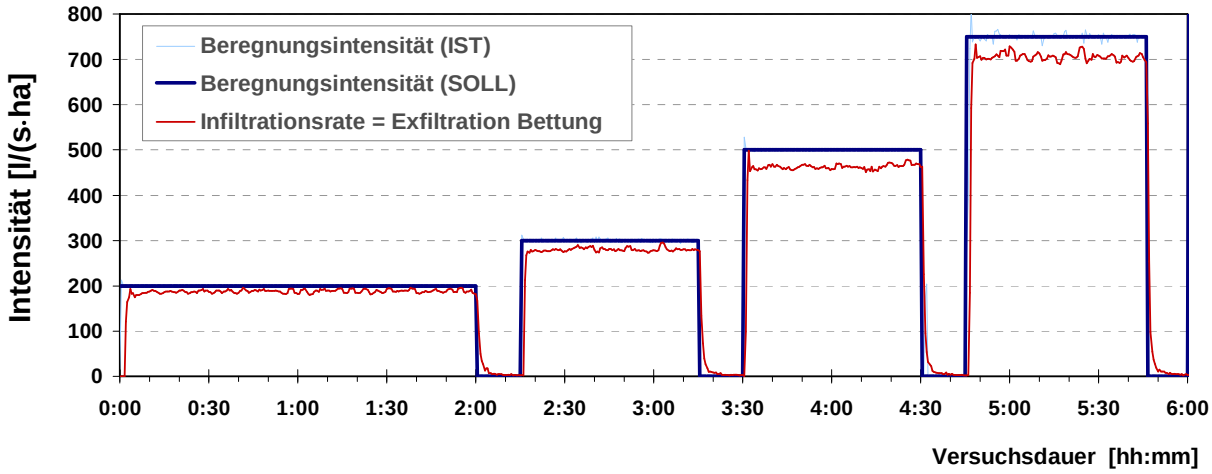


Abbildung 57: **Messergebnisse eines Pflasterbelages mit splittverfüllter Sickerfuge von 7 mm Breite in singulärer Anordnung ohne Tragschicht (1000 g/m² Quarzmehl, 2,5% Gefälle)**

Die Ergebnisse unterstreichen dagegen, 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.

4.2.4 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 58: 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 58). 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 auch unter realen Nutzungsbedingungen vermutlich bei diesen Belagstypen vollzieht. 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 meist an Bestandsflächen anzutreffen ist. Eine statistische Nachbearbeitung der Messdaten der FH Bochum[114] von 34 Porenbetonflächen hat bspw. ergeben, dass bei rd. 60% der dort untersuchten Beläge auch nach mehrjähriger Nutzung eine Infiltrationsleistung von ≥ 500 l/(s·ha) anzutreffen war; Infiltrationsleistungen von ≥ 250 l/(s·ha) gar an 70% der untersuchten Flächen (siehe Abbildung A - 5 im Anhang).

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

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

4.3 Charakterisierung des Versickerungsprozesses anhand der Untersuchungsergebnisse

Das Versickerungsverhalten verschiedener Pflasterbauweisen wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes anhand von Messungen an Bestandflächen sowie umfangreichen Lysimeterversuchen im Labor untersucht. Auf dieser Basis, zusammen mit den in Kap. 2.4 zusammen getragenen Erkenntnissen früherer Untersuchungen, soll der Infiltrationsprozess nachfolgend näher charakterisiert werden.

Eine Pflasterfläche weist generell einen schichtweisen Aufbau auf, wobei sich die einzelnen Schichten hinsichtlich ihres Versickerungsvermögens erheblich unterscheiden können. Die Tragschicht besteht i.d.R. aus sehr grobkörnigen, aber stark verdichteten Mineralstoffgemischen mit Durchlässigkeiten in der Größenordnung von $5 \cdot 10^{-4}$ m/s bis $5 \cdot 10^{-5}$ m/s und ist ebenso wie die wenige Zentimeter mächtige Pflasterbettung über die gesamte Grundfläche versickerungsfähig. Die Durchlässigkeit des Bettungsmaterials hängt in hohem Maße von dessen Körnungsstruktur ab. Sandiges Material ist dabei i.d.R. deutlich weniger durchlässig als Splitt. Dennoch stellt auch die Pflasterbettung im Regelfall keine nennenswerte hydraulische Barriere für in den Oberbau einsickerndes Wasser dar.

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

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

Neben der grundsätzlichen Durchlässigkeit der Fugenfüllmaterialien begrenzen vor allem in den Fugenraum eingetragene Feinpartikel das Infiltrationsvermögen

der Deckschicht. Im Laufe der Standzeit einer Flächenbefestigung bilden feine mineralische und organische Körner zusammen mit anthropogen bedingten Stäuben[115] eine Sedimentationsschicht an der Oberfläche des Fugenraumes, der zu einer erheblichen Reduktion des Versickerungsvermögens führen kann. Dieser als Kolmation bezeichnete Prozess kann je nach Standort und Nutzung in ganz unterschiedlicher Ausprägung auftreten und ist hauptsächlich dafür verantwortlich, dass das Infiltrationsvermögen nach mehrjähriger Nutzung in einem ganz erheblichen Maß variieren kann und nicht vorhersagbar ist. Die Anlagerung von Feinpartikeln in den Fugen kann bei feinkörnigerer Fugenfüllung dabei deutlich leichter und dadurch rascher erfolgen als bei grobkörnigeren Fugenfüllungen, bei denen Feinpartikel den Fugenraum passieren können.

Die Oberflächenneigung einer Fläche wirkt generell einer Infiltration des auftreffenden Regenwassers entgegen. Dabei ist der Einfluss des Oberflächengefälles umso ausgeprägter, je geringer das Versickerungsvermögen der Flächenbefestigung ist. Je kleiner der Fugenanteil, je geringer die Durchlässigkeit des Fugenmaterials und je höher der Kolmationsgrad einer Flächenbefestigung ist, umso stärker nimmt das Versickerungsmögen bei steigendem Gefälle ab. Daher spielt das Oberflächengefälle bei fugenarmen Pflasterbauweisen mit gefügedichten Pflastersteinen eine größere Rolle als bei Flächenbelägen mit einem hohen Anteil an meist splittgefüllten Fugen oder Kammern. Bei porösen Flächenbefestigungen konnte bislang sogar keinerlei negative Beeinträchtigung des Infiltrationsvermögens nachgewiesen werden.

Das momentane Infiltrationsvermögen einer konkreten Flächenbefestigung – also bei bestimmtem Aufbau, bestimmtem Oberflächengefälle sowie bestimmten Kolmationsgrad – wird ganz wesentlich von der Niederschlagsbelastung selbst beeinflusst. Sowohl Messungen an Bestandflächen[116] als auch die Lysimeterversuche im Rahmen dieses Forschungsprojektes haben einen signifikanten Zusammenhang zwischen der momentanen Infiltrationsrate und der jeweiligen Regen- bzw. Beregnungsintensität ergeben. Dabei kann die Infiltrationsleistung einer Pflasterfläche mit steigender Niederschlagsintensität z.T. deutlich ansteigen. Dies führt u.a. auch dazu, dass selbst bei vergleichsweise geringen Niederschlagsintensitäten bereits ein merklicher Oberflächenabfluss einsetzen kann, obwohl der Flächenbelag im Stande ist, bei etwas höheren Regenintensitäten noch weitaus mehr Wasser aufzunehmen. Das Einsetzen des Oberflächenabflusses markiert also nicht den Zeitpunkt, an dem das Versickerungsvermögen des Flächenbelages erschöpft ist. Es kennzeichnet lediglich die Phase der Beregnung, in der die Infiltrationskapazität der am geringsten durchlässigen Flächenbereiche über-

115 z.B. aus verkehrlicher Nutzung (Abrieb von Reifen, Bremsbelägen etc.)

116 Timmermann, U. (1998); siehe Kap. 2.4

schritten ist und der an diesen Stellen nicht direkt versickerbare Regenwasseranteil auch nicht auf angrenzenden Flächenbereiche in den Oberbau infiltrieren kann.

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

Der Infiltrationsverlauf über die Zeit ist durch eine mitunter sehr hohe Infiltrationsrate zu Beginn eines Regenereignisses gekennzeichnet, die im weiteren Verlauf rasch abnimmt und auf einem nahezu konstanten Niveau verharrt. Die hohen Anfangsinfiltrationsraten rühren in erster Linie daher, dass zunächst die Porenräume des Fugenmaterials (und ggf. des Bettungsmaterials) gefüllt werden müssen, bevor das Wasser tiefer in den Oberbau perkolieren kann. Sie entsprechend also nicht der hydraulischen Leitfähigkeit der Deckschicht, die deutlich geringer sein kann. Die Auffüllung des Porenraums erfolgt dabei aufgrund des deutlichen höheren Anteils an weiten und engen Grobporen wesentlich schneller als bei natürlichen Böden, so dass meist nach 5-10 Minuten bereits eine nahezu konstante Versickerungsrate zu beobachten ist.

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

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

folgt. Sättigungsgrade ≥ 50% werden daher in der Tragschicht nur selten erreicht.

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

Inwiefern die Versickerungsleistung von der Vorsättigung des Fugenmaterials bestimmt wird, kann bislang nicht eindeutig beantwortet werden. Die Laborversuche ergaben hier kein ganz eindeutiges Bild. Intervallartige Beregnungen mit unterschiedlichen Trockenperioden zwischen den Beregnungsphasen ergaben jedoch für einen fugenarmen Pflasterbelag aus Doppelverbundsteinen eine bis zu 10% reduzierte Infiltrationsrate zwischen Trockendauern von zwei und von 24 Stunden. Feldmessungen u.a. von Nolting et al. ergaben für weitaus durchlässigere Pflastertypen dagegen deutlich größere Unterschiede zwischen feuchtem und trockenem Zustand von über 50%.[117] 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.

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

4.4 Mathematische Beschreibung des Versickerungsprozesses auf wasserdurchlässigen Flächenbelägen

Der bislang meist verwendete Modellansatz nach Horton zur Simulation des Abflussbeitrages durchlässig befestigter Siedlungsflächen ist nicht in der Lage, mit einem einheitlichen Parametereinstellungen sachgerechte Ergebniswerte über das gesamte Niederschlagsspektrum hinweg zu liefern. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes versucht, aus der umfangreichen Datenbasis ein verbessertes Konzept zur mathematischen Beschreibung des Abfluss- und Versickerungsverhaltens abzuleiten.

Der zu entwickelnde Modellansatz soll in der Lage sein, die maßgeblichen physikalischen Prozesse mit einer höheren Genauigkeit 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. Dabei wurde nicht angestrebt, einen neuen Software-Baustein zu entwickeln, sondern lediglich ein Gedankenmodell, das als Grundlage einer späteren programmtechnischen Umsetzung dienen soll.

4.4.1 Konzeption des Berechnungsmodells

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

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

Zur Berücksichtigung dieser Anforderungen wurde ein bi-direktionales Schichtenmodell entworfen. Das Modell folgt in seiner Systemlogik dem prinzipiellen Aufbau einer versickerungsfähig ausgebildeten Flächenbefestigung, die sich aus einer teildurchlässigen Deckschicht, einer volldurchlässigen Unterlage (Bettungs- und Tragschicht) sowie einem mehr oder weniger durchlässigen Planum zusammen setzt. Dabei berücksichtigt das Modell die wesentlichen Einzelprozesse einschließlich ihrer zeitlichen Abfolge und kann daher als empirisch-

deterministischer Modellansatz bezeichnet werden. Ein Schema des Schichtenmodells ist in Abbildung 59 dargestellt.

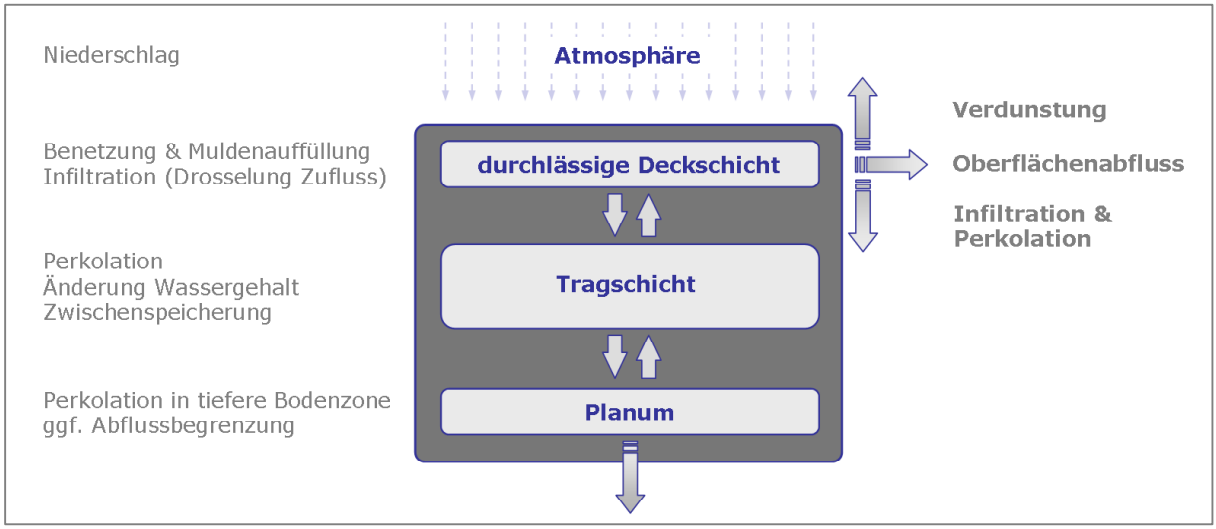


Abbildung 59: Schema des bi-direktionalen Schichtenmodells

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 Modell als Anfangverlust bilanziert (Oberflächenmodul). Die Regeneration des Verlustpotenzials in der Trockenphase wird konventionell, wie in Kap. 2.3.2 beschrieben, berechnet.

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

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

4.4.2 Infiltrationsmodul

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

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

In Abbildung 60 ist die Infiltrationsrate des fugenarmen Doppelverbundpflasters in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität für die vier im Labor betrachteten Kolmationsgrade aufgetragen. Der Abbildung liegen dabei die Messergebnisse an einem Belag mit 2,5% Gefälle bei einer 20-minütigen Beregnung zugrunde.

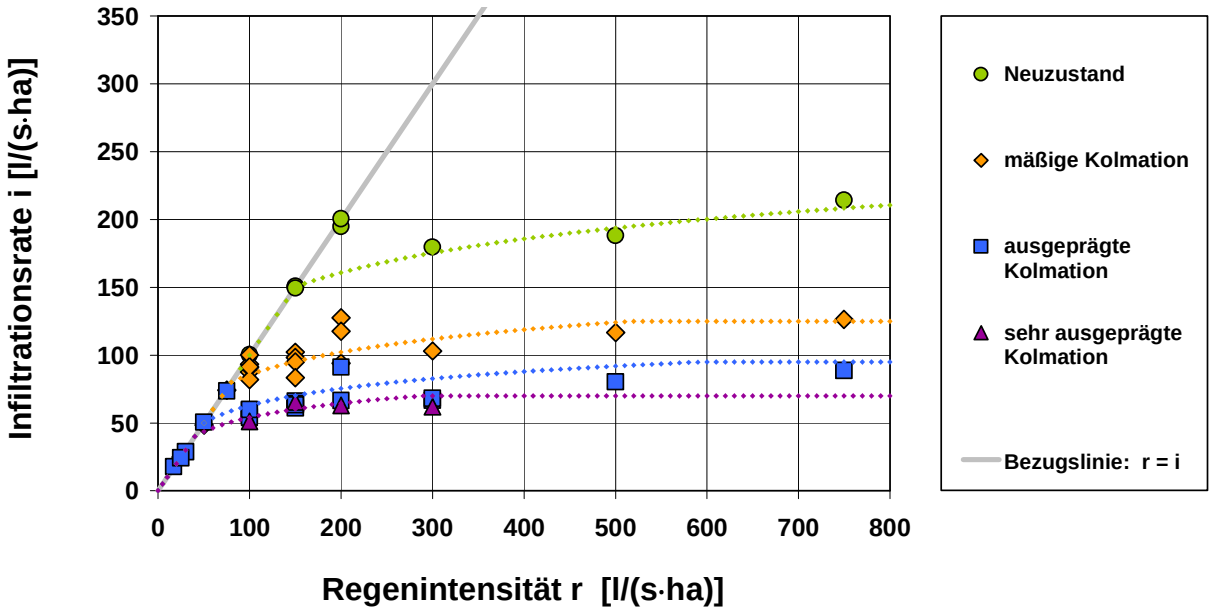


Abbildung 60: **Korrelation zwischen Infiltrationsrate und Niederschlagsintensität am Beispiel eines fugenarmen Verbundpflasters mit 2,5% Gefälle für die Dauerstufe D = 20 min**

Die mit der Beregnungsintensität ansteigende Infiltrationsrate kann durch die ebenfalls in Abbildung 60 grafisch dargestellten Regressionsfunktionen näherungsweise beschrieben werden. Je betrachteter Dauerstufe ergibt sich dabei eine andere Regressionsfunktion, da die Infiltrationsrate mit andauernder Beregnung tendenziell abnimmt. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 61 am Beispiel der Dauerstufen von 5, 15, 30 sowie 60 Minuten veranschaulicht. Diagramme über sämtliche betrachteten Dauerstufen sind im Anhang enthalten.

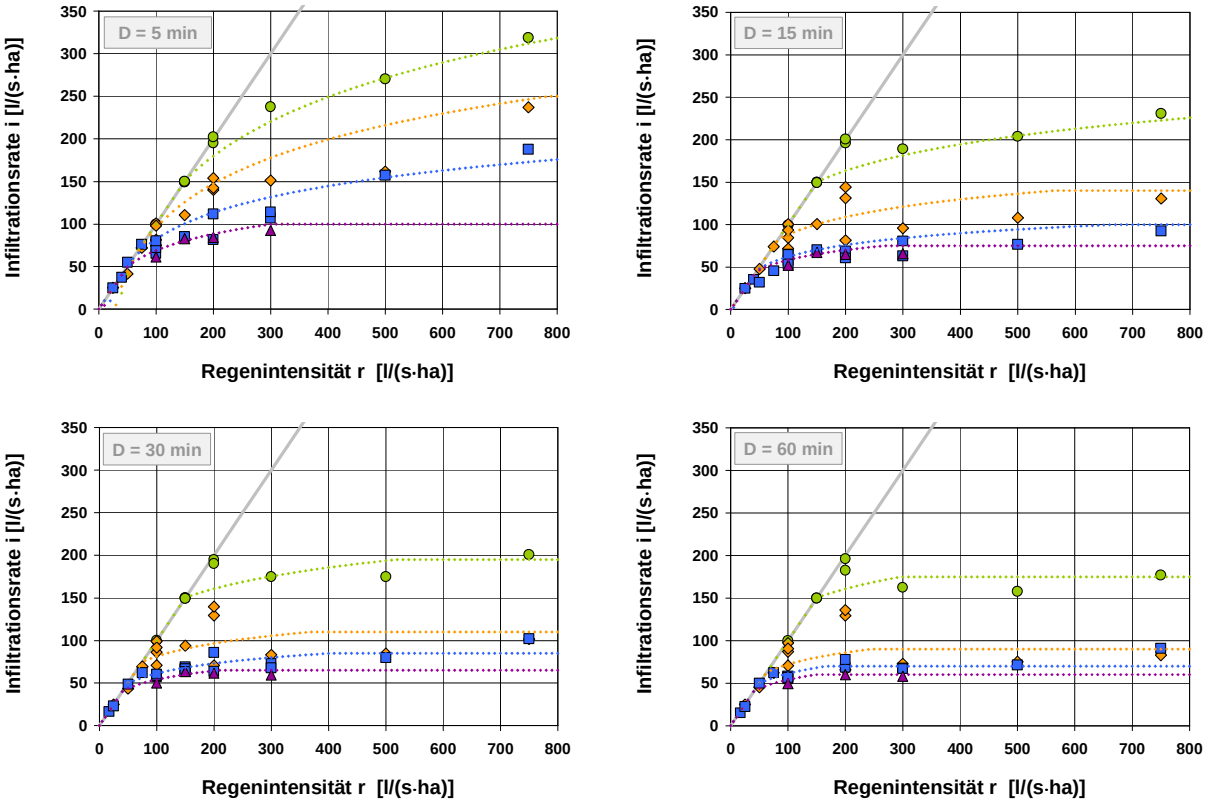


Abbildung 61: Korrelation zwischen Infiltrationsrate und Niederschlagsintensität am Beispiel eines fugenarmen Verbundpflasters mit 2,5% Gefälle für verschiedene Dauerstufen zwischen 5 min und 60 min[118]

Die Regression erfolgt dabei jeweils über eine Funktion der Form:

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

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

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

Die zur Anpassung der Regressionskurven an die Messwerte erforderlichen Parameterwerte für A, B und f_{max} für die einzelnen Dauerstufen sind in den nachste-

118 Legende siehe Abbildung 60

henden Diagrammen 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.

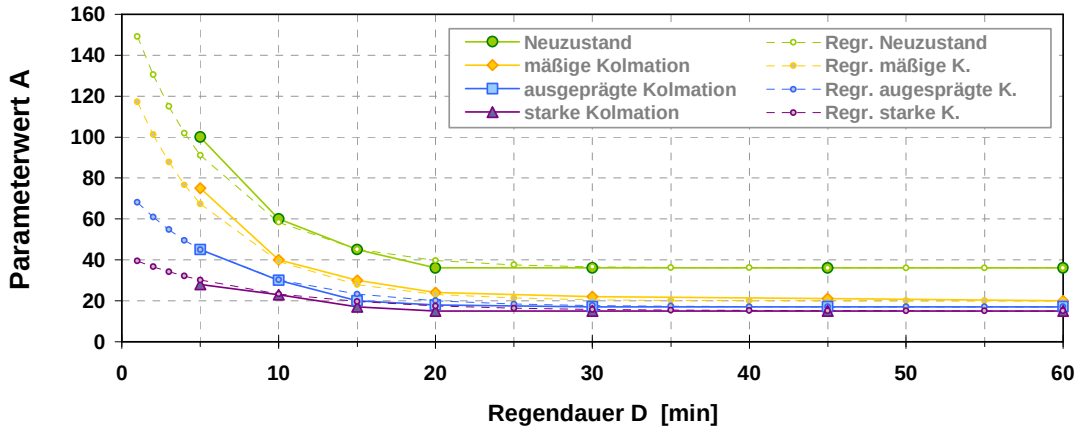


Abbildung 62: Parameterwerte A zur Regression der Infiltrationsrate

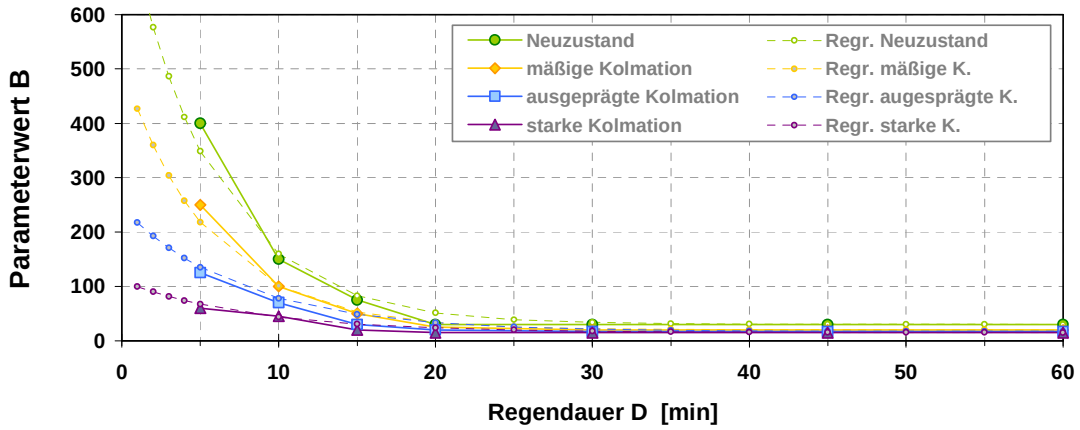


Abbildung 63: Parameterwerte B zur Regression der Infiltrationsrate

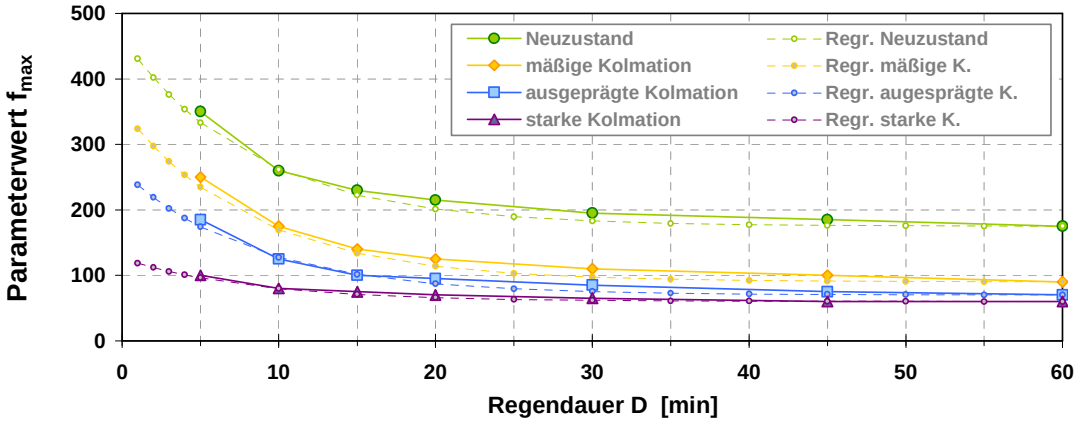


Abbildung 64: Parameterwerte f_{max} zur Regression der Infiltrationsrate

Die Regressionsparameter lassen sich dabei durch folgende Funktionen mathematisch beschreiben:

$$A = a_2 + (a_1 - a_2) \cdot e^{-D \cdot \kappa + 0{,}75}$$

$$B = b_2 + (b_1 - b_2) \cdot e^{-D \cdot \lambda + 0{,}75}$$

$$f_{max} = c_2 + (c_1 - c_2) \cdot e^{-D \cdot \mu + 0{,}5}$$

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 f_{max}

Die Anpassung der Regressionsparameter zweiter Ordnung an die Parameter A, B und fmax zur Beschreibung der intensitäts- und zeitabhängigen Infiltrationsrate ergab die in Tabelle 10 aufgeführten Zahlenwerte.

Tabelle 10: 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	0,0030	0,0030	0,0025	0,0020
Parameter B				
b_1	400	250	125	60
b_2	30	20	17	15
λ	0,0030	0,0030	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 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 Infiltrationsalgorithmus ausgenutzt werden kann. Hierzu wurden die Parameterwerte untereinander korreliert. Das Ergebnis der Korrelationsanalyse ist in Abbildung 65 grafisch dargestellt.[119]

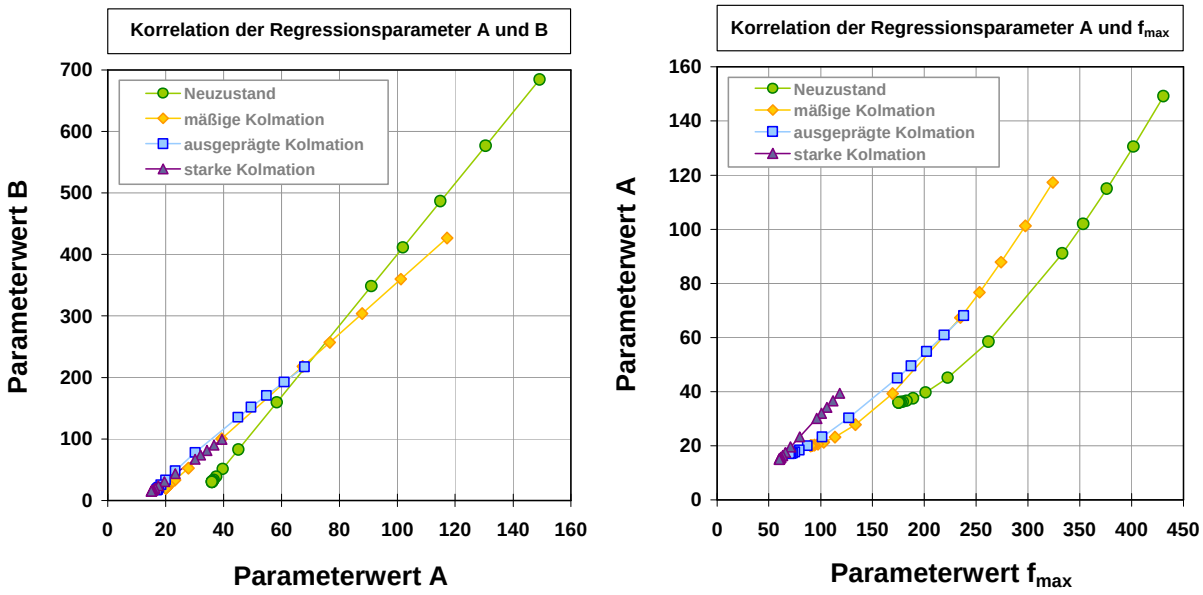


Abbildung 65: Korrelation der Parameterwerte A, B und f_{max}

Die Abbildung verdeutlicht, dass ein strenger Zusammenhang zwischen den Parameterwerten besteht. Zwischen den Parametern A und B wurde hierbei ein linearer Zusammenhang gefunden. Die Korrelation zwischen den Parametern A und f_{max} lässt sich über eine einfache Exponentialfunktion beschreiben:

$$A = \alpha_1 \cdot e^{\alpha_2 \cdot f_{max}}$$

$$B = \beta_1 \cdot A - \beta_2$$

A, B, f_{max}: Regressionsparameter 1. Ordnung
α_1, α_2: Regressionsparameter 2. Ordnung zur Bestimmung des Parameters A
β_1, β_2: Regressionsparameter 2. Ordnung zur Bestimmung des Parameters B

Damit lässt sich die Gleichung zur Beschreibung der zeit- und intensitätsabhängigen Infiltrationsrate wie folgt ausdrücken:

[119] siehe auch Korrelationsdiagramme im Anhang

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

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

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

Durch die Korrelation der Modellparameter untereinander 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 11 zusammengestellt. Sie besitzen für den betrachteten Flächentyp eines fugenarmen Pflasterbelages bei einem Gefälle von 2,5% generelle Gültigkeit; nicht jedoch für einen anderen Belagstyp.

Tabelle 11: Zahlenwerte der Modellparameter des Infiltrationsmodells für einen fugenarmen Pflasterbelag für verschiedene Kolmationsgrade

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

Die Abhängigkeit der Versickerungsrate vom Oberflächengefälle wird in dem o.g. Algorithmus nicht explizit berücksichtigt. Bislang sind die Kenntnisse zum Zusammenhang von Oberflächengefälle und Infiltrationsvermögen noch sehr begrenzt. Die exemplarischen Beregnungsversuche, die im Rahmen der Labormessreihe an unterschiedlichen Oberflächenneigungen durchgeführt wurden, haben eine Reduktion des Infiltrationsvermögens je nach Gefälledifferenz und Kolmationsgrad von bis 35% ergeben. Vereinfachend werden daher die in Tabelle 12 angegebenen Abminderungsfaktoren ζ_J verwendet. Die Infiltrationsrate ergibt sich schließlich durch Multiplikation der Infiltrationsrate nach o.g. Gleichung mit dem pauschalen Abminderungsfaktor: $f(J,r,D) = f(r,D) \cdot \zeta$.

Tabelle 12: Abminderungsfaktoren ζ_J der Infiltrationsrate in Abhängigkeit vom Oberflächengefälle

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

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

Eine Alternative könnte die Verknüpfung des Modellparameters f_{max} mit der Trockenperiode darstellen. Hierzu könnte 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 im Anhang enthalten.

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.

Das vorstehend beschriebene Infiltrationsmodell wurde im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes speziell für einen fugenarmen Pflasterbelag mit einem Fugenanteil von rd. 5% abgeleitet und entwickelt, ist aber grundsätzlich auf alle Pflastertypen anwendbar. Allerdings reichen die im Rahmen des Projektes durchgeführten Beregnungsversuche bislang nicht aus, um für das gesamte

Flächenspektrum adäquate Zahlenwerte der Modellparameter bestimmen zu können. Hierzu wären weitergehende Messungen im Labor oder an Bestandflächen erforderlich. Die grundsätzliche Anwendbarkeit auch für andere Flächentypen sei jedoch exemplarisch mit nachstehender Abbildung 66 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.

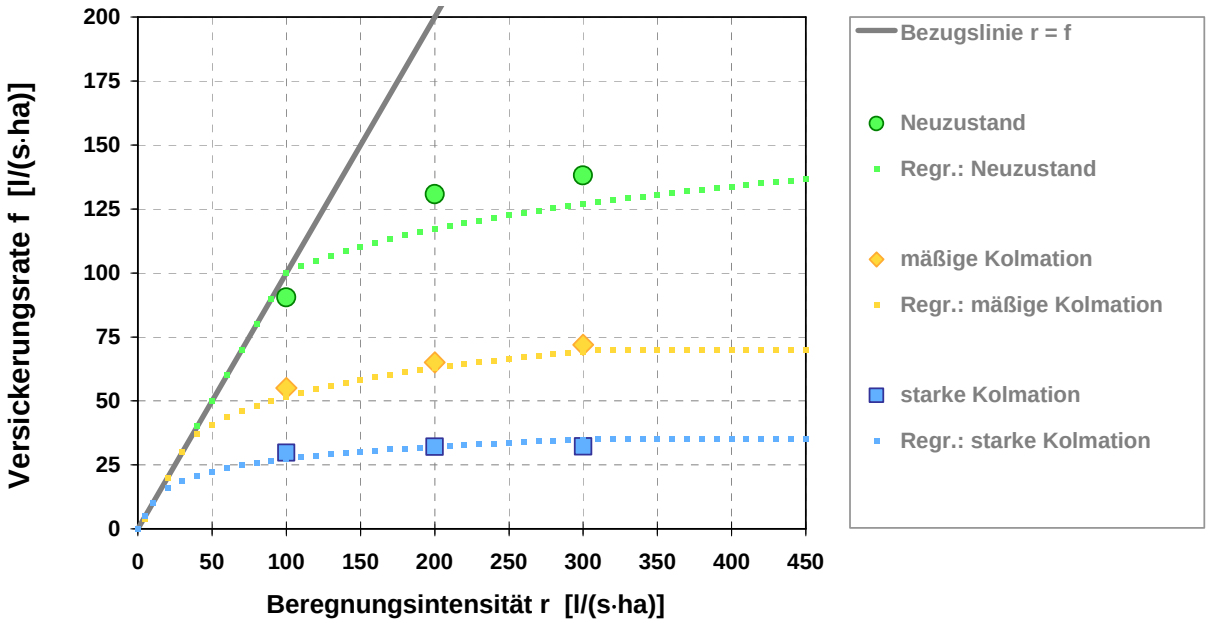


Abbildung 66: **Gegenüberstellung gemessener und errechneter Infiltrationsraten für einen Plattenbelag mit einem Fugenanteil von 1,8% bei einer Regendauer von D = 30 min**

Als Alternative zu dem vorstehend beschriebenen Ansatz wurde im Rahmen des Projektes noch ein zweiter Ansatz verfolgt, bei dem die aktuelle Infiltrationsrate als Funktion der kumulativen Niederschlagshöhe beschrieben wird. Auch dieser Ansatz wurde aus den Versuchsergebnissen an fugenarmen Pflasterbelägen abgeleitet. Die Infiltrationsrate ergibt sich hierbei nach folgender Gleichung:

$$f_{min} \leq f(h_N(t), D(t)) = \phi_1 \cdot \ln(h_N(t)) + \phi_2 \leq f_{max}$$

$$\text{mit } \phi_2 = C_1 \cdot e^{-C_2 \cdot D} + C_3 \cdot D - C_4$$

f_{min}:	Regressionsparameter 1. Ordnung
f_{max}:	Regressionsparameter 1. Ordnung
ϕ_2:	Regressionsparameter 1. Ordnung
$C_{1,2,3,4}$:	Regressionsparameter 2. Ordnung
$h_N(t)$:	kumulative Niederschlagshöhe seit Ereignisbeginn
D(t):	Regendauer seit Ereignisbeginn

Bei diesem Ansatz bewegt sich die Infiltrationsrate zwischen zwei Schwellenwerten f_{min} und f_{max}. Abhängig von der je Dauerstufe erreichten Niederschlagshöhe nimmt die Infiltrationsrate höhere oder niedrigere Werte ein.

Der Zusammenhang zwischen der kumulativen Niederschlagshöhe und der Infiltrationsrate, wie er sich aus Messung und Berechnung ergibt, ist in nachstehender Grafik veranschaulicht. Eine weitere Darstellung befindet sich im Anhang.

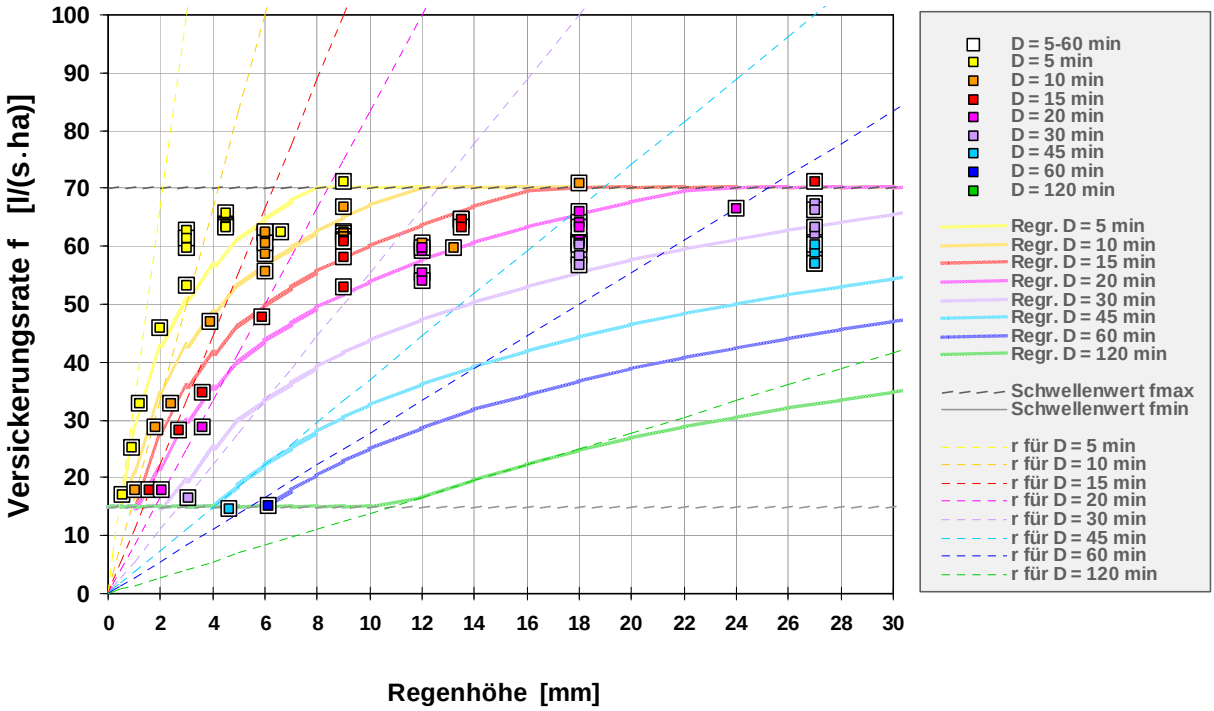


Abbildung 67: **Infiltrationsrate in Abhängigkeit der kumulativen Niederschlagshöhe und der Regendauer am Beispiel eines fugenarmen Pflasterbelages mit ausgeprägter Kolmation[120]**

Dieser Ansatz ist zwar grundsätzlich ein wenig einfacher; er vermag jedoch das Versickerungsvermögen bei intensitätsvariablem Niederschlag auch nicht so gut wieder zu geben wie der zuvor genannte Algorithmus. Im Rahmen der Laborversuche wurde darüber hinaus kein signifikanter Zusammenhang zwischen der kumulativen Regenhöhe und dem Infiltrationsvermögen, wie er häufig für natürliche Böden beschrieben wird, gefunden. Der in der Grafik ersichtliche Zusammenhang zwischen der kumulativen Niederschlagshöhe und der Infiltrationsrate ist in erster Linie auf die jeweils unterschiedlichen (konstanten) Beregnungsintensitäten zurückzuführen.

120 Parameterwerte: ϕ_1 = 20; C_1 = 78; C_2 = 0,025; C_3 = 0,025; C_4 = 40; f_{min} = 15 l/(s·ha); f_{max} = 70 l/(s·ha);

Überdies reichen die aus den Laborversuchen gewonnenen Messdaten noch nicht aus, um für einen mathematischen Ansatz dieser Form die zugehörigen Berechnungsparameter vollständig anpassen zu können. Hierzu wurden zu wenig differierende Niederschlagshöhen betrachtet (siehe Abbildung 67). Inwiefern der Ansatz dennoch in der Lage wäre, das Versickerungsvermögen bei intensitätsvariablen Niederschlägen, bei denen die Niederschlagshöhe nicht konstant über die Regendauer zunimmt, abzubilden, kann aus Mangel an Referenzwerten nicht beurteilt werden. Insgesamt jedoch erscheint der erstgenannte Algorithmus der zielführendere zu sein.

4.4.3 Speichermodell

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

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

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

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

ΔV: Änderung des Speichervolumens je Flächeneinheit
q_{in}: Zufluss zur Tragschicht (Infiltrationsrate $f(t)$)
q_{out}: Abfluss aus der Tragschicht (hydraulische Leitfähigkeit K der Tragschicht)
Δt: Berechnungszeitschritt

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

Die Aufgabe des Speichermodells ist jedoch lediglich, die Infiltrationsrate im Falle einer Sättigung der Tragschicht auf die hydraulische Leitfähigkeit des Planums zu begrenzen. Diese Bedingung ist entsprechend in den Berechnungsgang zu imp-

lementieren. Gleichwohl reicht die vereinfachte Methodik sicher aus, um die Speicherwirkung der Tragschicht und den Effekt eines gesättigten Oberbaus mit angemessener Genauigkeit nachbilden zu können.

5 Anwendungsempfehlungen für die Urbanhydrologie

Die Abschätzung oder Ermittlung des Abflussbeitrages wasserdurchlässig ausgebildeter Flächenbeläge im Rahmen entwässerungstechnischer Planungen ist beileibe keine triviale Aufgabe. Der Planer sieht sich hier konfrontiert mit einer enormen Schwankungsbreite des Versickerungsvermögens. Daher ist stets eine sehr sorgfältige Wahl 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 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 im Rahmen dieses Forschungsprojektes anhand von Literaturstudium, Feld- und Labormessungen gesammelten Ergebnisse werden nachfolgend verschiedene Bemessungskennwerte abgeleitet, die als Orientierungsgrößen zu verstehen sind. Nicht alle ausgewiesenen Werte wurden im Rahmen von Messungen ermittelt, sondern vielfach auf der Grundlagen des zusammen getragenen Kenntnisstandes sinnvoll abgeschätzt. Dabei wurde den beobachteten Zusammenhängen zwischen dem Infiltrationsvermögen und der Regenintensität, dem Oberflächengefälle sowie dem Kolmationsgrad Rechnung getragen. Die Empfehlungen umfassen in erster Linie Abflussbeiwerte zur konventionellen Abflussberechnung sowie Parameterwerte zur Anwendung von Niederschlagsabflussmodellen.

5.1 Abflussbeiwerte zur Dimensionierung entwässerungstechnischer Anlagen

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 Spitzenabflussabflussbeiwerten. 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 zur 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. Die empfohlenen Werte sind daher als mittlere Abflussbeiwerte sowie als Spitzenabflussbeiwerte zur Bemessung anwendbar.

Darüber hinaus wurde auf eine Differenzierung nach der konkreten Dauer des Bemessungsregens ebenfalls verzichtet. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist bei wasserdurchlässigen Flächenbefestigungen nur innerhalb der ersten Minuten mit einer deutlichen Abnahme des Versickerungsvermögens zu rechnen. Mit zunehmender Durchlässigkeit des Befestigungstyps stellen sich sogar häufig konstante Versickerungsraten ein. Die Einflussfaktoren Niederschlagsintensität, Kolmationsgrad und Gefälle schlagen hier weitaus erheblicher zu Buche, so dass die – dennoch nicht ganz sachgerechte – Vernachlässigung der Regendauer die insgesamt existente Ungenauigkeit nicht in nennenswertem Umfang erhöht. Überdies liegen bislang zu wenige Kenntnisse vor, inwiefern sich die Versickerungskapazität je nach Regendauer und Sättigungszustand ändert. Abnehmende wie auch ansteigende Infiltrationsraten wurden hier schon beobachtet.

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

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

Die Differenzierung enthält darüber hinaus keinerlei stochastische Bewertung hinsichtlich der Eintretenswahrscheinlichkeit der einzelnen Kolmationsgrade. Verwertbare Erkenntnisse liegen diesbezüglich bislang nicht bzw. nur in sehr begrenztem Umfang vor[121], stellen aber eine unabdingbare Voraussetzung für eine solche Zuordnung dar. Hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

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

Abbildung 68 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 100 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.

[121] siehe bspw. Abbildung A - 5 und Abbildung A - 6 im Anhang

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.

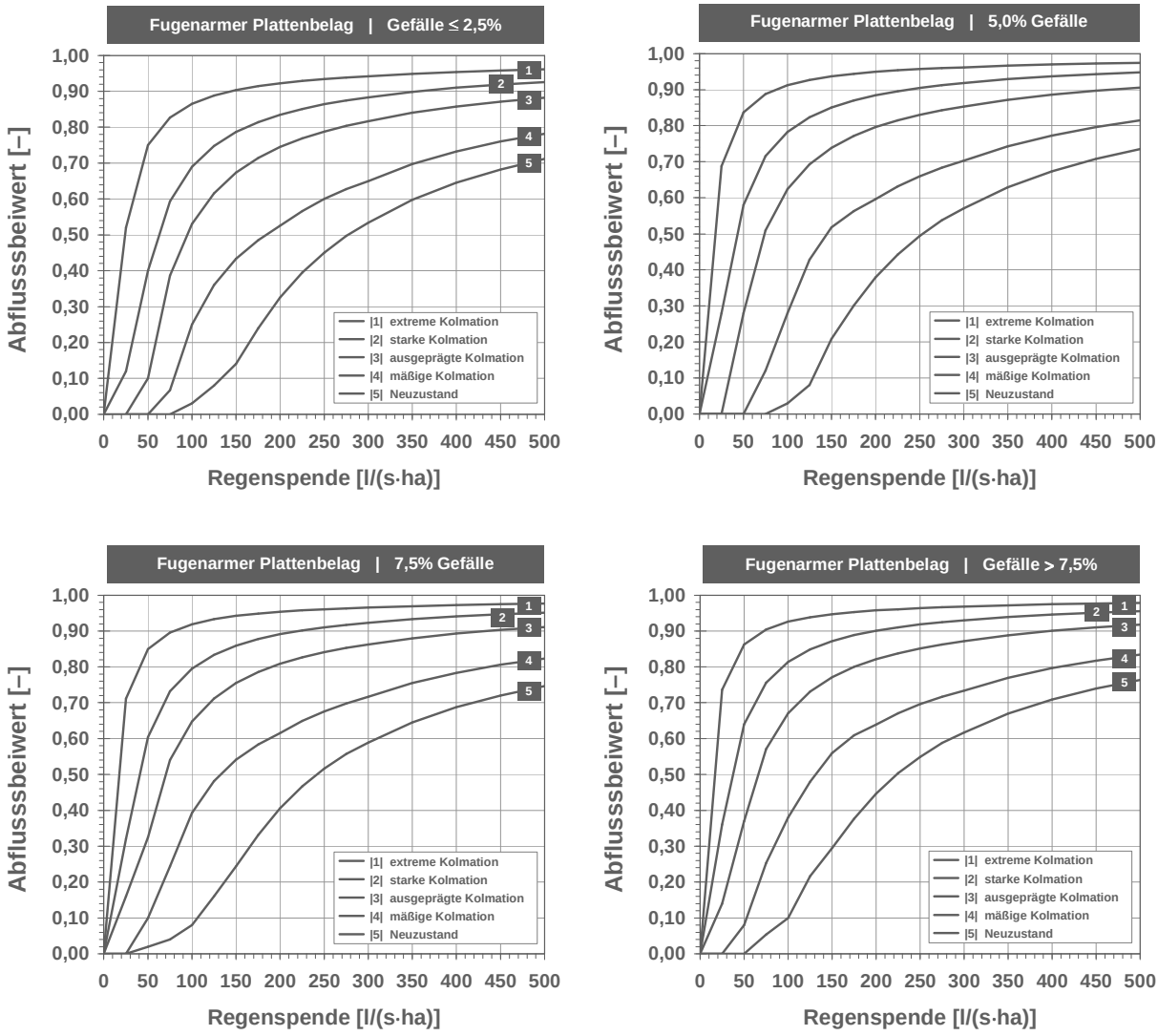


Abbildung 68: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenarm verlegte Plattenbeläge (Fugenanteil ≤ 3%)

Die empfohlenen Abflussbeiwerte für herkömmliches, fugenarm verlegtes Pflaster aus gefügedichten Natur- oder Betonsteinen sind in Abbildung 69 dargestellt. Hierunter fallen alle Pflasterbauweisen aus gängigen Rechteck- und Verbundsteinen, die Fugenweiten ≤ 5 mm aufweisen und deren Fugen mit sandigen Aggregaten verfüllt sind. Bei Pflasterbauweisen mit splittverfüllten Fugen ist dagegen ein deutlich höheres Versickerungsvermögen zu erwarten. Sie fallen daher nicht unter diese Gruppe.

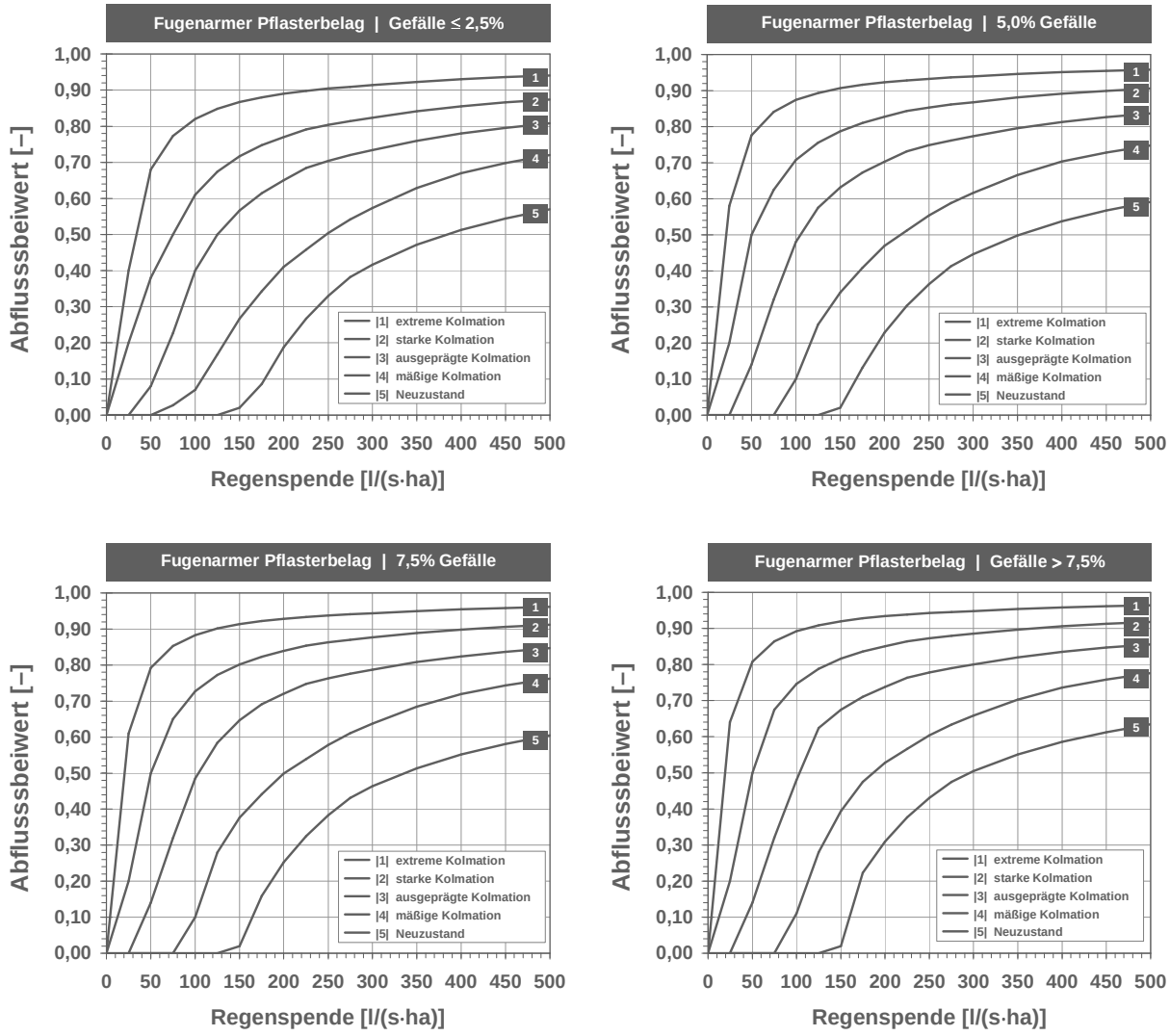


Abbildung 69: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenarm verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 3%-6%)

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 lediglich 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 70 dargestellt, in entsprechend hohen Abflussbeiwerten für diesen Gebrauchszustand wider. Abflussbeiwerte > 0,70 sind dagegen nur in Ausnahmefällen und bei Niederschlagsbelastungen ≥ 300 l/(s·ha) zu erwarten.

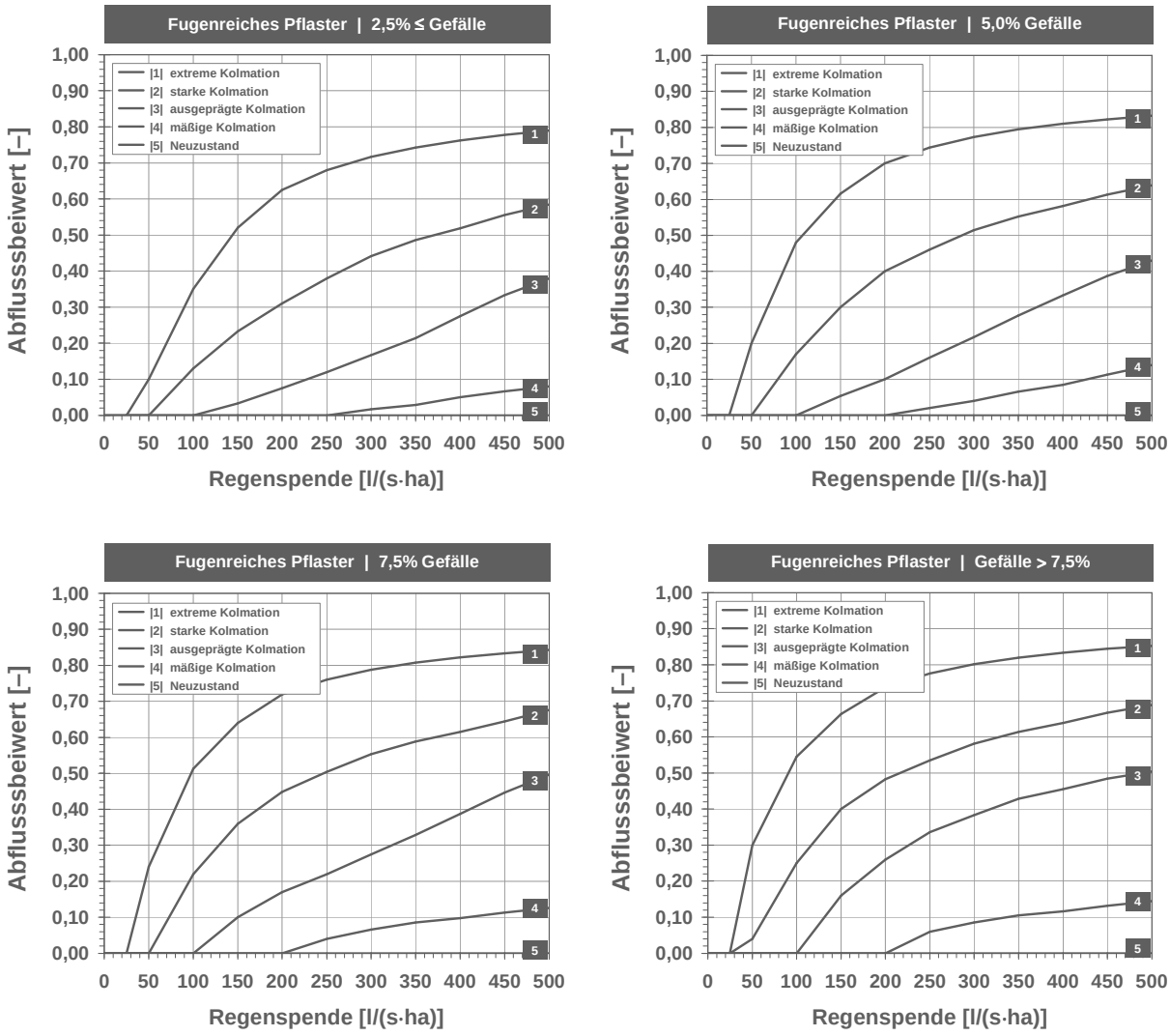


Abbildung 70: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für fugenreich verlegte Pflasterbeläge (Fugenanteil 6%-12%)

Bei Pflasterbelägen mit splittgefüllten Fugen oder Kammern ist dagegen selbst bei sehr ausgeprägtem Eintrag von Feinpartikeln in die Fugen dauerhaft mit einer vergleichsweise hohen Infiltrationskapazität zu rechnen. Zudem ist bei diesem Pflastertyp von einem deutlich geringeren Einfluss des Oberflächengefälles auf die Versickerungsleistung auszugehen. Entsprechend liegen die in Abbildung 71 ausgewiesenen Zahlenwerte auf deutlich niedrigerem Niveau. Dabei wird bspw. angenommen, dass eine Infiltrationsrate von über 100 l/(s·ha) immer anzutreffen ist.

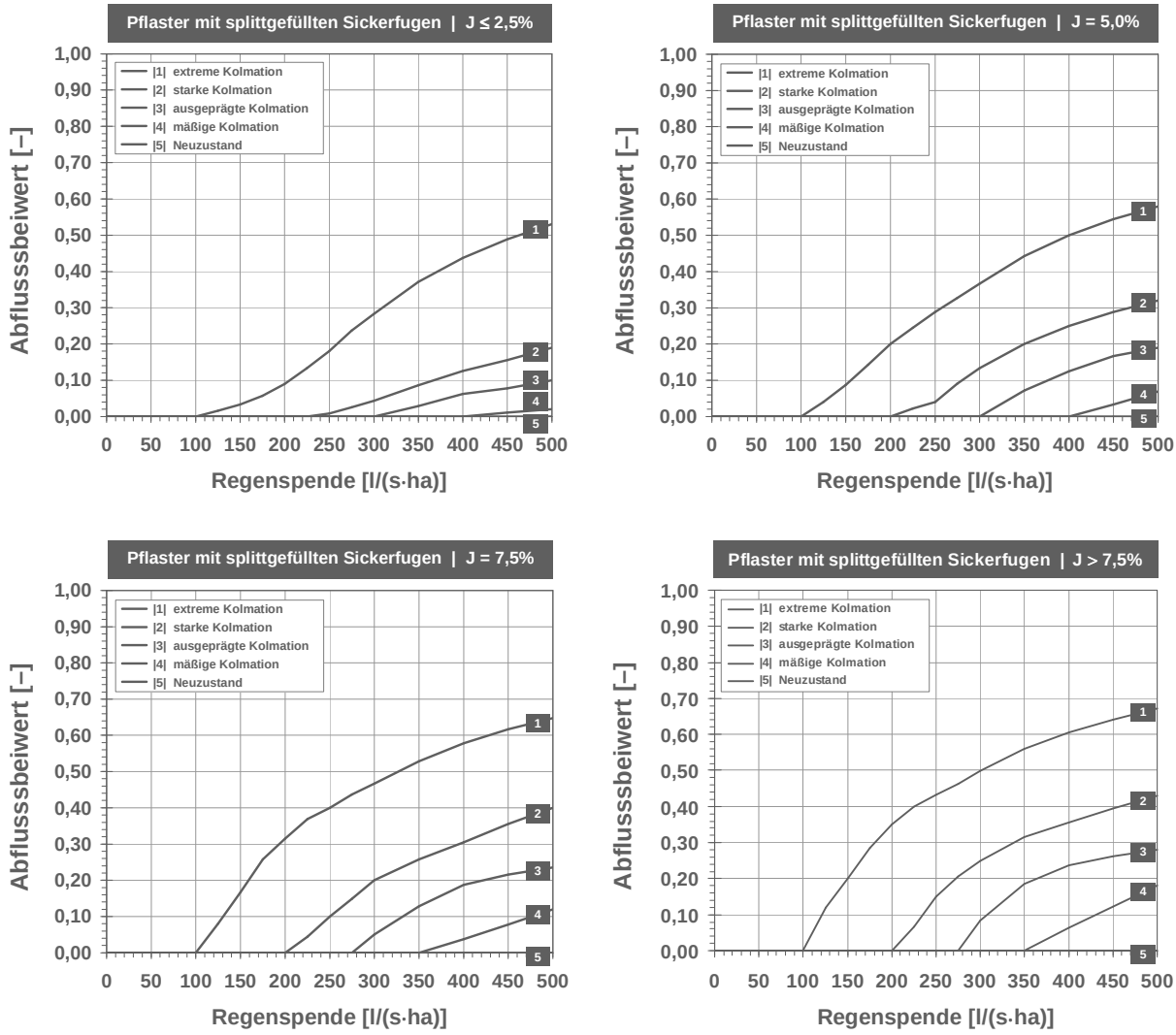


Abbildung 71: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für Pflasterbeläge mit splittgefüllten Fugen oder Kammern (Fugenanteil 6%-12%)

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 72 dargestellten Abflussbeiwerten Rechnung getragen.

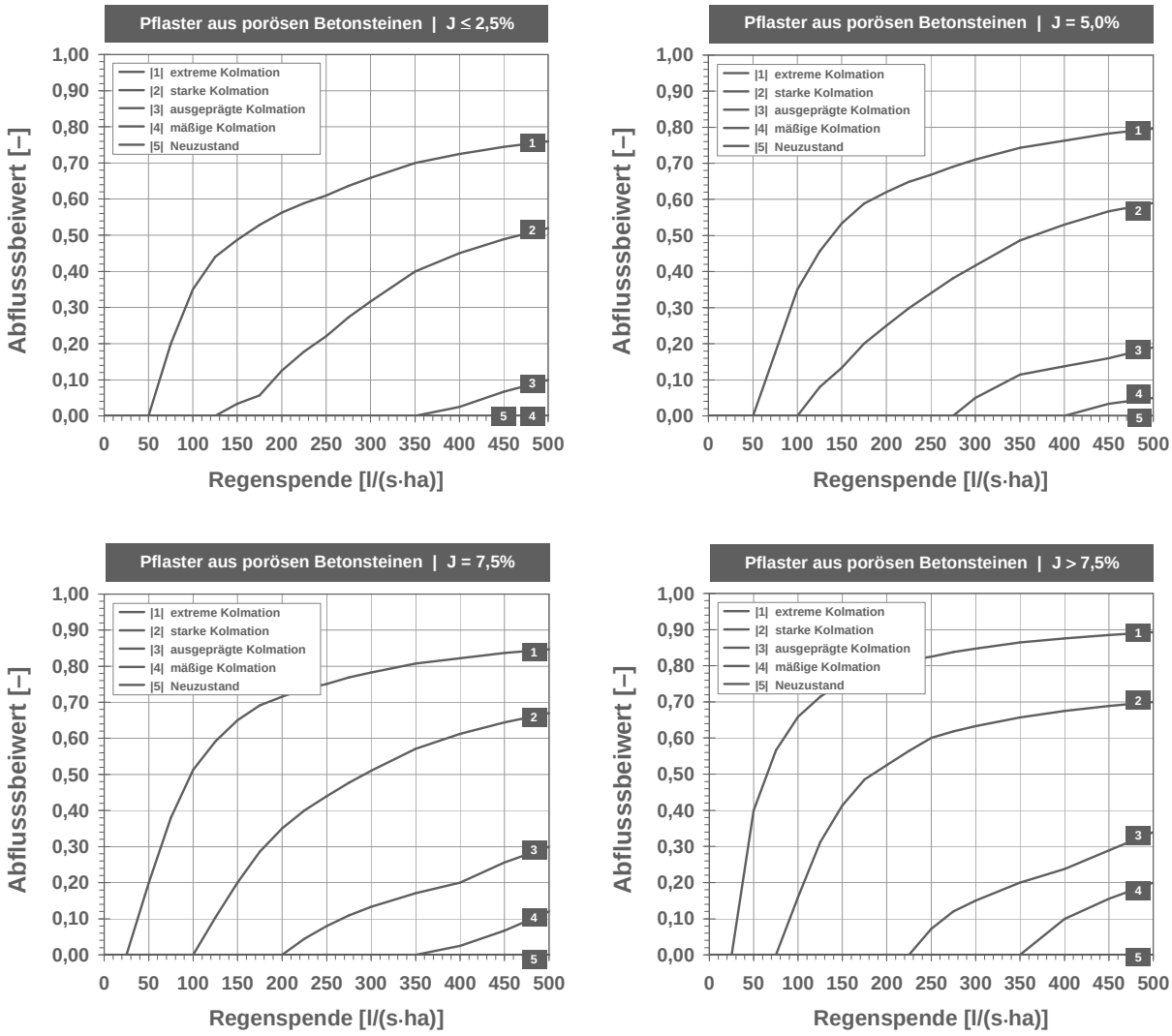


Abbildung 72: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für poröse Pflasterbeläge aus hauf-werksporigen Betonsteinen

Über die Versickerungskapazitäten von Flächenbefestigungen aus Rasengitterbelägen und Schotterrasen sind keine umfangreichen Untersuchungen bekannt. Sie waren auch nicht Bestandteil des Untersuchungsprogramms im Rahmen dieses Forschungsprojektes. In der Fachliteratur finden sich lediglich einige wenige Kennwerte zum Versickerungsvermögen diese Flächentypen[122], 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

122 u.a. Kolb et al. (1998), Kolb et al. (2000) und Nolting et al. (2005)

Regenintensität berücksichtigt, da hierfür die vorhandenen Datenlage nicht ausreicht. Die in Abbildung 73 dargestellten Abflussbeiwerte stellen daher nur eine grobe Abschätzung dar. Dennoch verdeutlichen sie, dass insbesondere bei Rasengitter- und Rasenpflasterbelägen kaum mit einem Abflussbeitrag zu rechnen ist. Schotterrasen wird dagegen ein etwas geringeres Versickerungsvermögen zugewiesen. Hier sind durchaus nennenswerte Oberflächenabflüsse zu erwarten.

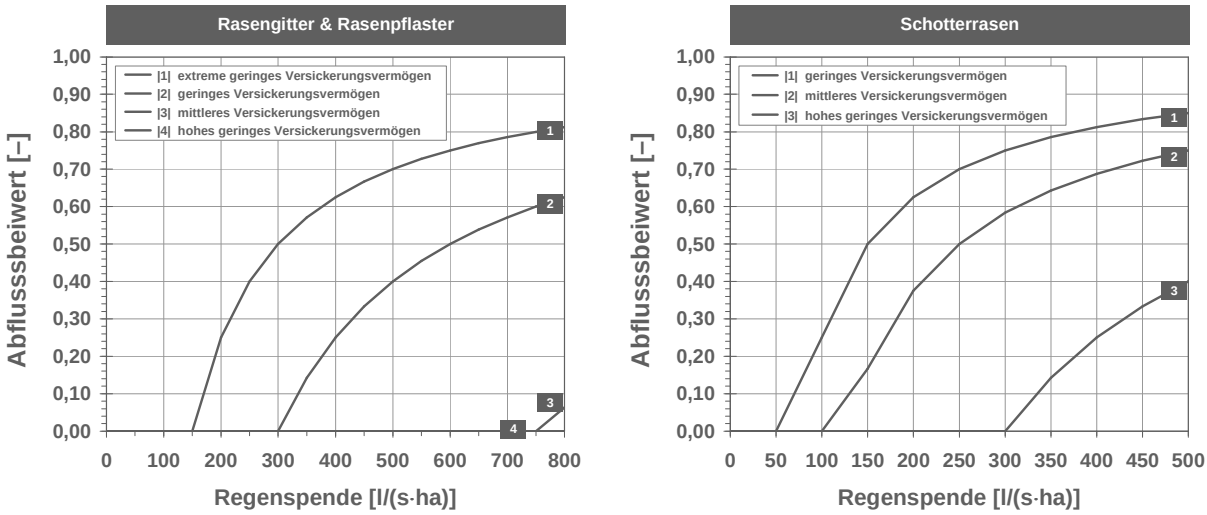


Abbildung 73: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Oberflächengefälle, Kolmationsgrad und Regenintensität für Flächenbefestigungen aus Rasengitter und Schotterrasen

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

5.2 Parameterwerte im Berechnungsansatz nach Horton

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

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

Die Anfangs- und die Endfiltrationsraten nach Horton können unmittelbar aus den bekannten Versickerungskapazitäten abgeleitet werden. Dabei stellt sich lediglich die Schwierigkeit, einen sinnvollen Wert für die Anfangsversickerungsrate festzulegen. Der Ansatz von Horton kann das mit der Niederschlagsintensität de facto variierende Versickerungsvermögen nicht wider spiegeln. Bei der Betrachtung unterschiedlicher Niederschlagsbelastungen wären folglich unterschiedliche Anfangsversickerungsrate anzusetzen. Während dies bei der Berechnung von Einzelereignissen generell möglich ist, muss im Rahmen von Kontinuumssimulationen jedoch ein fester Parametersatz gewählt werden. Dennoch werden nachfolgend flächenspezifische Parameterwerte in Abhängigkeit von der Niederschlagsbelastung ausgewiesen. Je nach Anforderung und Ziel der Planungsaufgabe muss dann entsprechend der dabei im Vordergrund stehenden Ereignischarakteristik ein geeigneter Parametersatz ausgewählt werden.

Die beiden nachstehenden Tabellen enthalten die empfohlenen Wertebereiche der Anfangsversickerungsrate, differenziert nach zwei verschiedenen Kolmationsgraden. Die je Flächentyp angegebenen Zahlenwerte erstrecken sich dabei mitunter über einen großen Wertebereich und spiegeln damit die hohe Variabilität im Versickerungsvermögen der betrachteten Befestigungsarten wieder. Tabelle 15 und Tabelle 16 enthalten die zugehörigen Wertebereiche der Endinfiltrationsrate.

Tabelle 13: Empfohlener Wertebereich der Anfangsversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei deutlicher Kolmation

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

Tabelle 14: Empfohlener Wertebereich der Anfangsversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei mäßiger Kolmation

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

Tabelle 15: Empfohlener Wertebereich der Endversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei deutlicher Kolmation

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

Tabelle 16: Empfohlener Wertebereich der Endversickerungsrate im Modellansatz nach Horton in [l/(s·ha)] bei mäßiger Kolmation

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

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

Im Ansatz nach Horton wird dieser Rückgang in der Versickerungsrate über den Abnahmekoeffizient k beschrieben. In Abbildung 74 sind die mit verschiedenen Abnahmekoeffizienten resultierenden Verläufe der Infiltrationsrate exemplarisch dargestellt. Zur Anwendung auf wasserdurchlässige Flächenbefestigungen werden pauschal Zahlenwerte von 0,10-0,50 min^{-1} empfohlen.

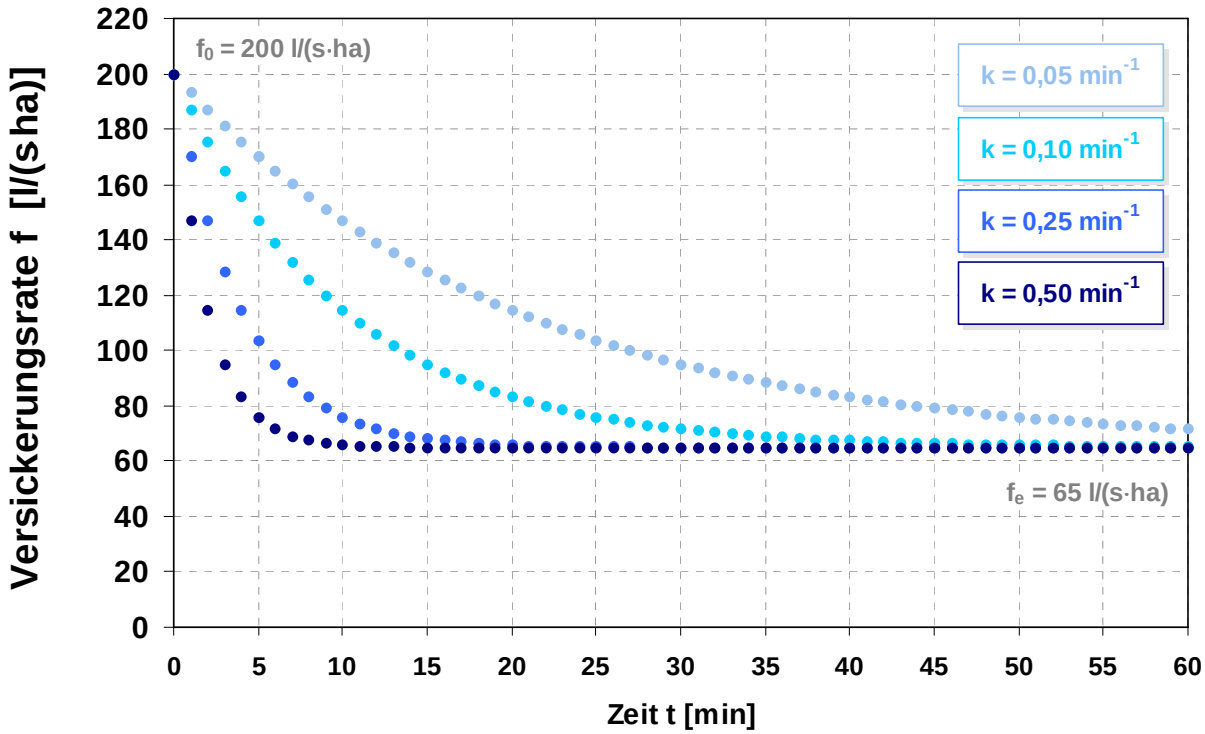


Abbildung 74: Verlauf der Infiltrationsrate im Ansatz nach Horten für verschiedene Abnahmekoeffizienten

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 75 veranschaulicht wird dadurch sichergestellt, dass rechnerisch nach einer Trockenperiode von 24 Stunden die Anfangs-

versickerungsrate 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.

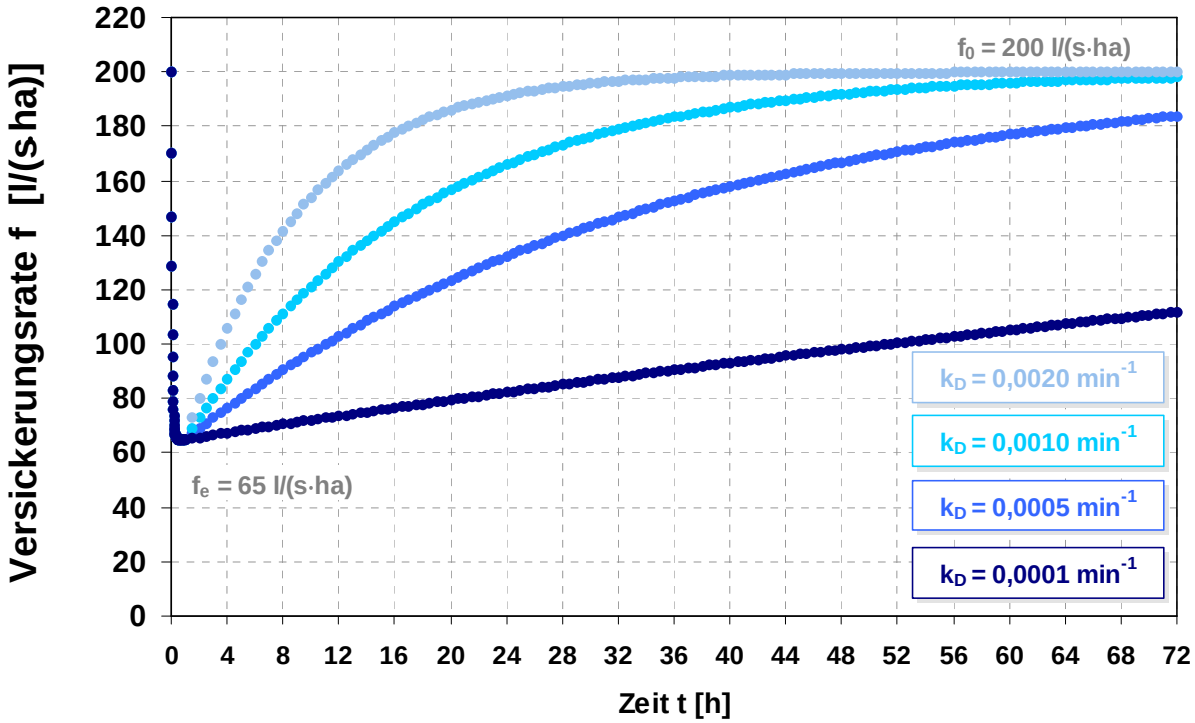


Abbildung 75: Verlauf der Infiltrationsrate im Ansatz nach Horten für verschiedene Regenerationskoeffizienten

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.[123] Die Versickerungskapazität durchlässig befestigter Siedlungsflächen muss jedoch angesichts der inzwischen verfügbaren Ergebnisse und Erkenntnisse höher bewertet werden als bislang. Die bisherigen Empfehlungen mussten sich dagegen noch auf eine weitaus begrenztere Datenbasis stützen. Sie orientierten sich in erster Linie an den im technischen Regelwerk verankerten Abflussbeiwerten, die in bezug auf versickerungsfähige Flächenbefestigungen seit langem vielfach als zu hoch kritisiert werden.[124]

Die im Rahmen diese Forschungsprojektes erarbeiteten Empfehlungen zu den Abflussbeiwerten sowie den Modellparametern im Ansatz nach Horton vermögen

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

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

dagegen das Versickerungshalten durchlässiger Flächenbeläge weitaus besser wider zu spiegeln.

6 Zusammenfassung und Fazit

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

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde der bisherige Kenntnisstand zum Versickerungsvermögen wasserdurchlässiger Flächenbeläge zusammengetragen. Die Synthese der in der Fachliteratur dokumentierten Erkenntnisse wurde ausführlich dargestellt und erörtert (Kap. 2.4). Den Kern der Untersuchung bildete ein eigenes Messprogramm, das sowohl Feldmessungen an Bestandsflächen als auch Beregnungsversuche an einer Lysimeteranlage unter Laborbedingungen umfasste.

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

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

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

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

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

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

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

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

7 Literatur

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

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. (2003): 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 Beton- und 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.

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

Biwer, C. (2007):Praktische Untersuchung des Versickerungsvermögens von wasserdurchlässigen Flächenbelägen auf dem Campus der TU Kaiserslautern, Studienarbeit am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität Kaiserslautern, unveröffentlicht.

Borgwardt, S., Gerlach, A., Köhler, M. (2000): Versickerungsfähige Verkehrsflächen - Anforderungen, Einsatz und Bemessung, Springer Verlag.

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.; Köhler, M. (2001): Kommentierung des Merkblatts für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen. Fachvereinigung Betonprodukte für Straßen-, Landschafts- und Gartenbau (SLG), Bonn.

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

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.; 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.

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

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

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

DWD (2005): Starkniederschlagshöhen für die Bundesrepublik, Deutschland – KOSTRA-DWD-2000, Ausgabe 2005, Deutscher Wetterdienst, Offenbach/Main, und itwh, Hannover.

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.

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

FGSV (1998): Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

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

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.

Flühler, H. und Roth, K. (2003): Physik der ungesättigten Zone, Lehrmanuskript der ETH Zürich.

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

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

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

Hunt, W. F. III and 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/).

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

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

Kölbl, A. (2006): Angewandte Physik – Bodenhydrologie; Lehrmanuskript der Technischen Universität München; http://www.wzw.tum.de/bk/.

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

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

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

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

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

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.

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

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

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

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 für die Bemessung und Abflusssimulation von Entwässerungsanlagen, KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, 48. Jg., Dezember 2001, S. 1720-1728.

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

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

Statistisches Bundesamt (2006): Datenreport 2006 - Zahlen und Fakten über die Bundesrepublik Deutschland, Bundeszentrale für politische Bildung.

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. und Kenter, G. (1993): Abflussbildungsansätze für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung, SuG - Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz 24/1993.

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

ANHANG

Anhang A-1: 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_{M153}
Schrägdach	Metall, Glas, Schiefer, Faserzement	0,9 – 1,0
	Ziegel, Dachpappe	0,8 – 1,0
Flachdach (Neigung bis 3° oder ca. 5 %)	Metall, Glas, Faserzement	0,9 – 1,0
	Dachpappe	0,9
	Kies	0,7
Gründach (Neigung bis 15° oder ca. 25 %)	humusiert < 10 cm Aufbau	0,5
	humusiert ≥ 10 cm Aufbau	0,3
Straßen, Wege und Plätze (flach)	Asphalt, fugenloser Beton	0,9
	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 Gräben *)	toniger Boden	0,5
	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

Tabelle A - 2: Abflussbeiwerte ψ_{A128} nach ATV-DVWK-M 177 (2001) zur Ermittlung der Rechengröße $A_{u,A128}$ nach ATV-Arbeitsblatt A 128

Flächentyp	Art der Befestigung	ψ_{A128}
Schrägdach	Metall, Glas, Schiefer, Faserzement	1,0
	Ziegel, Dachpappe	1,0
Flachdach (Neigung bis 3° oder ca. 5 %)	Metall, Glas, Faserzement	1,0
	Dachpappe	1,0
	Kies	0,9
Gründach (Neigung bis 15° oder ca. 25 %)	humusiert < 10 cm Aufbau	0,8
	humusiert ≥ 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
nicht angeschlossene Flächen		0,0

Tabelle A - 3: Abflussbeiwerte nach DIN EN 752-4 (1997)

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 m²
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, Rollkies auch mit befestigten Teilflächen, wie:	0,0
	– Gartenwege mit wassergebundener Decke oder	
	– Einfahrten und Einzelstellplätze mit Rasengittersteinen	

*) siehe FLL (2000), Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen

Tabelle A - 5: Empfohlene Spitzenabflussbeiwerte nach DWA-Arbeitsblatt A 118 (2006) in Abhängigkeit vom Befestigungsgrad γ

γ [%]	Gruppe 1 $I_G < 1$ %				Gruppe 2 $1\ \% \le I_G \le 4\ \%$				Gruppe 3 $4\ \% < I_G \le 10\ \%$				Gruppe 4 $I_G > 10\ \%$			
	für r_{15} [l/s·ha] von															
	100	130	180	225	100	130	180	225	100	130	180	225	100	130	180	225
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

*) Befestigungsgrade ≤ 10 % bedürfen i.d.R. einer gesonderten Betrachtung

Anhang A-2: Zahlen- und Parameterwerte zur Modellierung des Oberflächenabflusses

Tabelle A - 6: Monatsspezifische Reduzierungsfaktoren der Benetzungsverlusthöhen und Monatswerte der mittleren täglichen Verdunstungsraten[125]

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

[125] z.B. Verworn, H.-R. (1999) und Verworn, H.-R. und Kenter, G. (1993)

Anhang A-3: Messergebnisse zum Versickerungsvermögen aus der Fachliteratur

Tabelle A - 7: Abfluss- und Versickerungskennwerte für verschieden Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow für neue Flächenbefestigungen[126]

Typ	Baumuster	Deckschicht	Fugenanteil [%]	Baujahr	Vers. Nr.	Beregnungsintensität r [l/(s·ha)]	Beregnungshöhe R [mm]	Infiltration I [mm]	Infiltrationsanteil I/R [%]	Anfangsverlust AV [mm]	Muldenrückhalt MR [mm]	mittlere Infiltrationsrate i_m [l/(s·ha)]	Endinfiltrationsrate i_E [l/(s·ha)]
neue Flächenbefestigungen	1	Betonverbundpflaster, sandverfugt	5,3%	1992	1.1	96	34,5	12,1	35%	1,3	1,4	34	32
					1.2	194	35,0	5,6	16%	1,7		31	30
	2	Rasengittersteine	27,7%	1990	2.1	82	29,5	29,5	100%	29,5	—	82	kein Abfluss
					2.2	171	33,8	33,8	100%	25,2		171	kein Abfluss
	3	Rasengittersteine	27,7%	1990	3.1	90	33,0	9,9	30%	4,3	2,9	27	22
					3.2	183	33,0	4,2	13%	3,2		23	22
	4	Verbundpflaster, nicht verfugt	4,6%	1993	4.1	87	31,5	31,5	100%	31,5	—	87	kein Abfluss
					4.2	201	36,3	36	99%	36		200	199
	5	Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen	7,8%	1993	5.1	89	32,0	32	100%	32	—	89	kein Abfluss
					5.2	187	56,3	56,3	100%	56,3		188	kein Abfluss
	6	Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen	8,9%	1993	6.1	96	34,5	12	35%	7,3	1,4	33	31
					6.2	186	33,5	7,6	23%	1,7		42	31
	7	Betonsteinpflaster mit Rasenfugen	22,8%	1994	7.1	90	32,5	7,7	24%	1,5	1,5	21	16
					7.2	193	34,8	3,3	9%	1,7		18	16
	8	Betonsteinpflaster mit Rasenfugen	22,8%	1994	8.1	90	32,5	21,7	67%	3,2	1,5	60	56
					8.2	189	34,0	10,7	31%	2,2		59	51
	9	kunstharzgebundene Decke	100%	1994	9.1	90	32,5	32,5	100%	32,5	—	90	kein Abfluss
					9.2	207	37,3	22,7	61%	1,7		126	128

126 aus Breuste, J. et al (1996)

Tabelle A - 8: Abfluss- und Versickerungskennwerte für verschieden Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow für gealterte Flächenbefestigungen[127]

Typ	Bau-muster	Deckschicht	Fugen-anteil [%]	Bau-jahr	Vers. Nr.	Beregnungs-intensität r [l/(s·ha)]	Beregnungs-höhe R [mm]	Infiltration I [mm]	Infiltrations-anteil I/R [%]	Anfangs-verlust AV [mm]	Mulden-rückhalt MR [mm]	mittlere Infiltrationsrate i_m [l/(s·ha)]	Endinfiltrations-rate i_E [l/(s·ha)]
gealterte Flächenbefestigungen	10	Großformatplatten	1,7%	1977	10.1	94	34,0	6	18%	1,9	0,9	17	14
					10.2	192	34,5	3,3	10%	0,9		18	15
	11	Betongehwegplatten	5,2%	ca. 1950	11.1	97	35,6	5,5	15%	1,7	1,6	15	15
					11.2	197	35,5	2,7	8%	1,7		15	13
	12	Kopfsteinpflaster, steinverfugt	19,6%	1944	12.1	97	14,0	2,9	21%	4,4	2,1	20	27
					12.2	192	41,4	6,2	15%	2,5		29	28
	13	Kopfsteinpflaster, steinverfugt	10,9%	1944	13.1	90	32,5	4,8	15%	2,1	2,7	13	10
					13.2	197	35,5	2,6	7%	2,8		14	14
	14	Mosaikpflaster	6,2%	1900	14.1	94	34,0	4,2	12%	1,6	1,5	12	10
					14.2	189	34,0	2	6%	1,5		11	8
	15	Mosaikpflaster	22,4%	1900	15.1	100	36,0	6,3	18%	1,8	1,5	17	17
					15.2	192	34,5	3,4	10%	1,7		19	17
	16	Natursteinplatten (Granit)	2,3%	1900	16.1	93	33,5	4,1	12%	1,1	1,1	11	8
					16.2	197	35,5	1,7	5%	1,1		9	8

127 aus Breuste, J. et al (1996)

Tabelle A - 9: Abfluss- und Versickerungskennwerte für verschieden Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow für wassergebundene Decken[128]

Typ	Baumuster	Deckschicht	Fugenanteil [%]	Baujahr	Vers. Nr.	Beregnungsintensität r [l/(s·ha)]	Beregnungshöhe R [mm]	Infiltration I [mm]	Infiltrationsanteil I/R [%]	Anfangsverlust AV [mm]	Muldenrückhalt MR [mm]	mittlere Infiltrationsrate i_m [l/(s·ha)]	Endinfiltrationsrate i_E [l/(s·ha)]
wassergebundene Decken	17	wassergebundene Decke	100%	1975	17.1	72	24,3	7,1	29%	2,6	—	21	17
	18	wassergebundene Decke	100%	1991	18.1	96	34,5	9,2	27%	2,7	2,5	26	23
					18.2	197	35,5	4,4	12%	2,8		24	23
	19	wassergebundene Decke	100%	1993	19.1	97	35,0	3	9%	2,5	1,1	8	3
					19.2	197	35,5	1,5	4%	1,1		8	2
	20	wassergebundene Decke	100%	1993	20.1	100	36,0	1,6	4%	2,1	0,5	4	3
					20.2	204	36,8	1,1	3%	0,5		6	2
	21	wassergebundene Decke mit Deckschicht aus Feinkies	100%	1993	21.1	93	33,5	14,1	42%	3,2	1,3	39	35
					21.2	194	35,0	7,2	21%	1,6		40	36

128 aus Breuste, J. et al (1996)

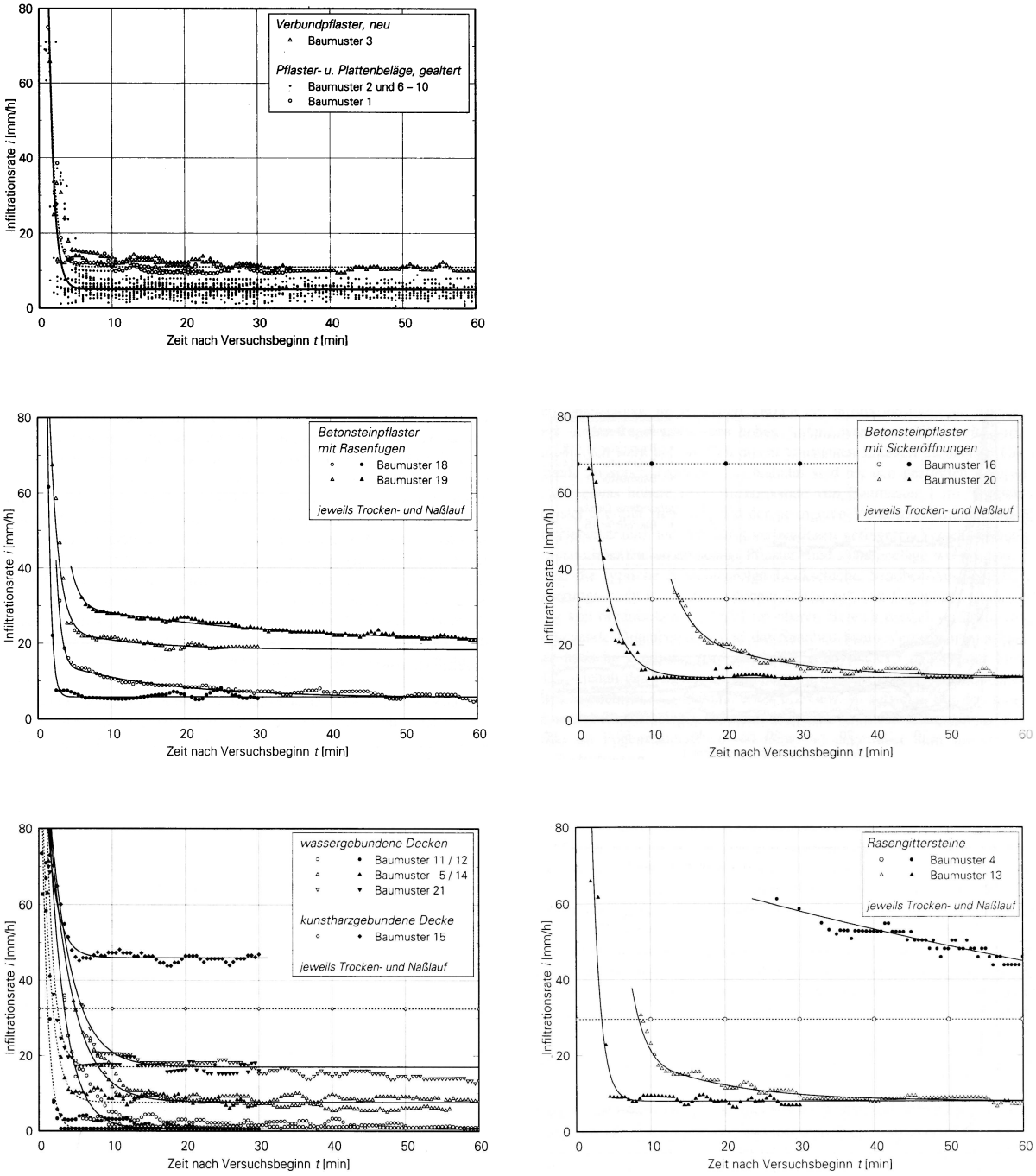


Abbildung A - 1: Gemessene Infiltrationsverläufe für verschiedene Flächenbefestigungen nach Schramm und Münchow[129]

129 aus Breuste (1996)

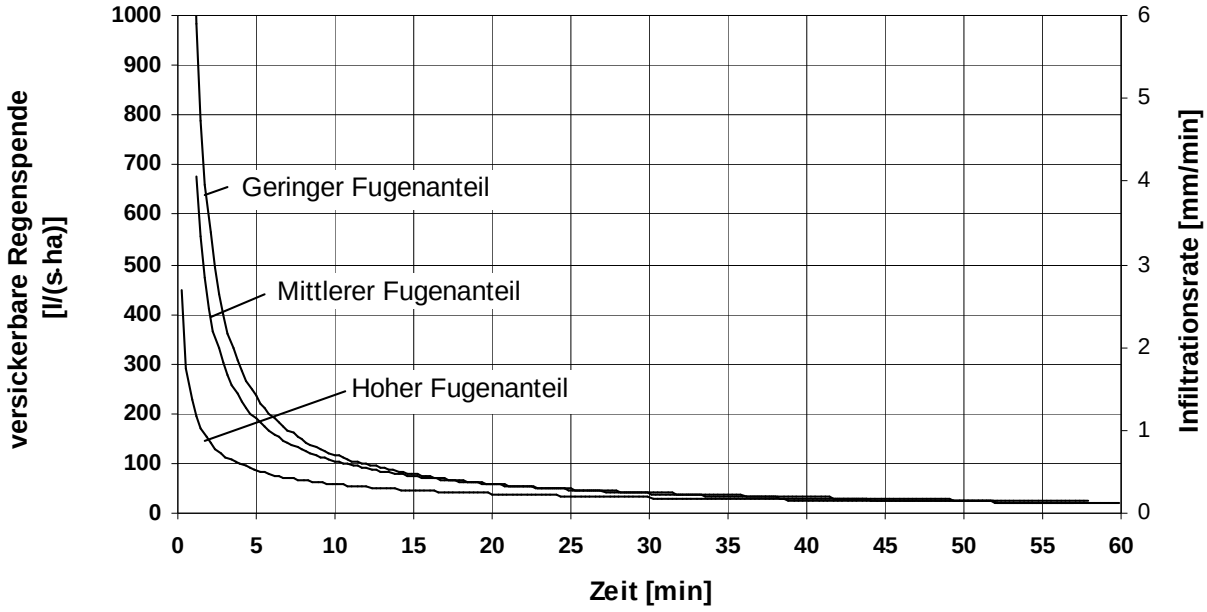


Abbildung A - 2: Infiltrationsraten von Pflasterflächen in Abhängigkeit vom Fugenanteil nach Borgwardt[130]

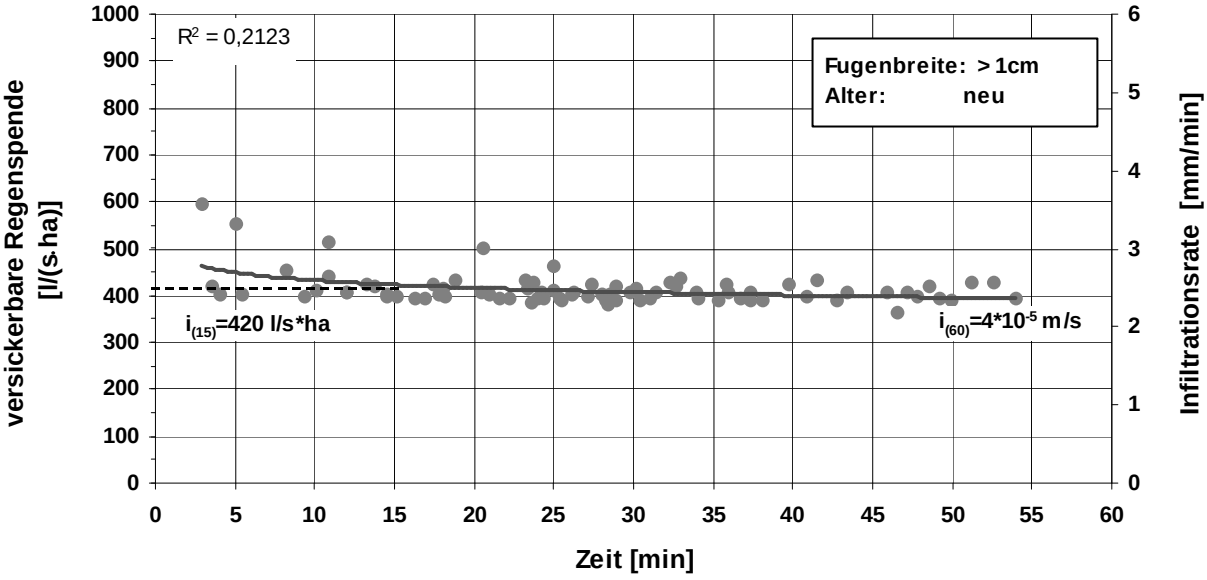


Abbildung A - 3: Infiltrationsraten von neuen Pflasterflächen mit aufgeweiteten Fugen, Kammern oder Sickeröffnungen nach Borgwardt[131]

130 Borgwardt, S. (1995)

131 ebenda

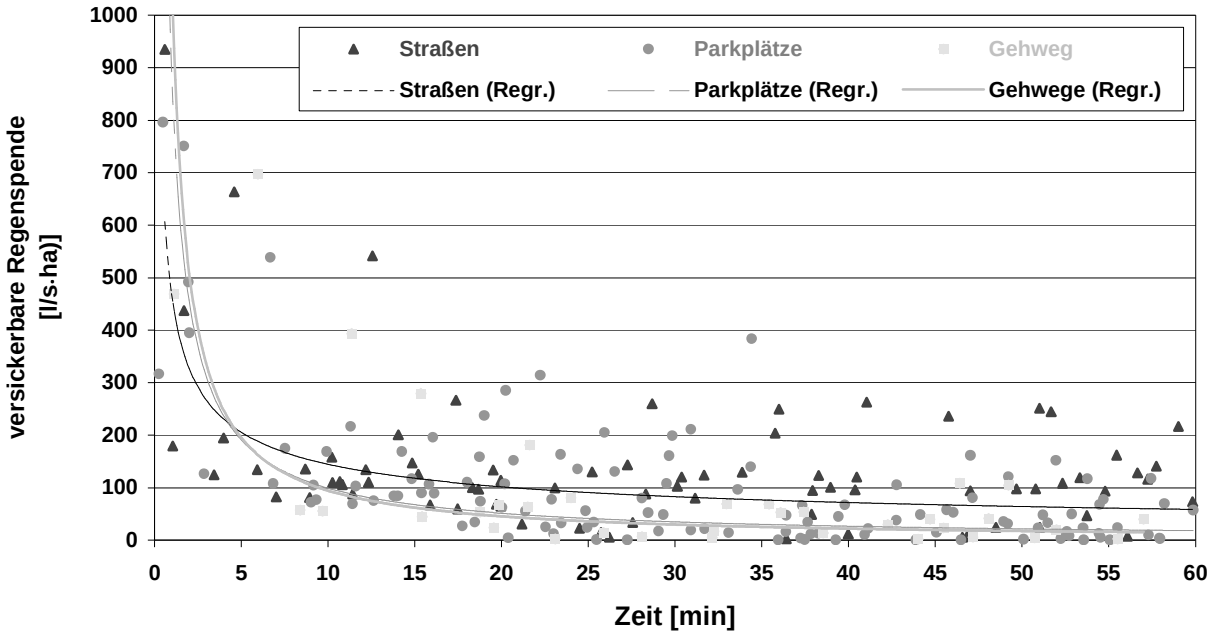


Abbildung A - 4: Infiltrationsraten von Pflasterflächen in Abhängigkeit von der Nutzung[132]

132 Borgwardt, S. (1995)

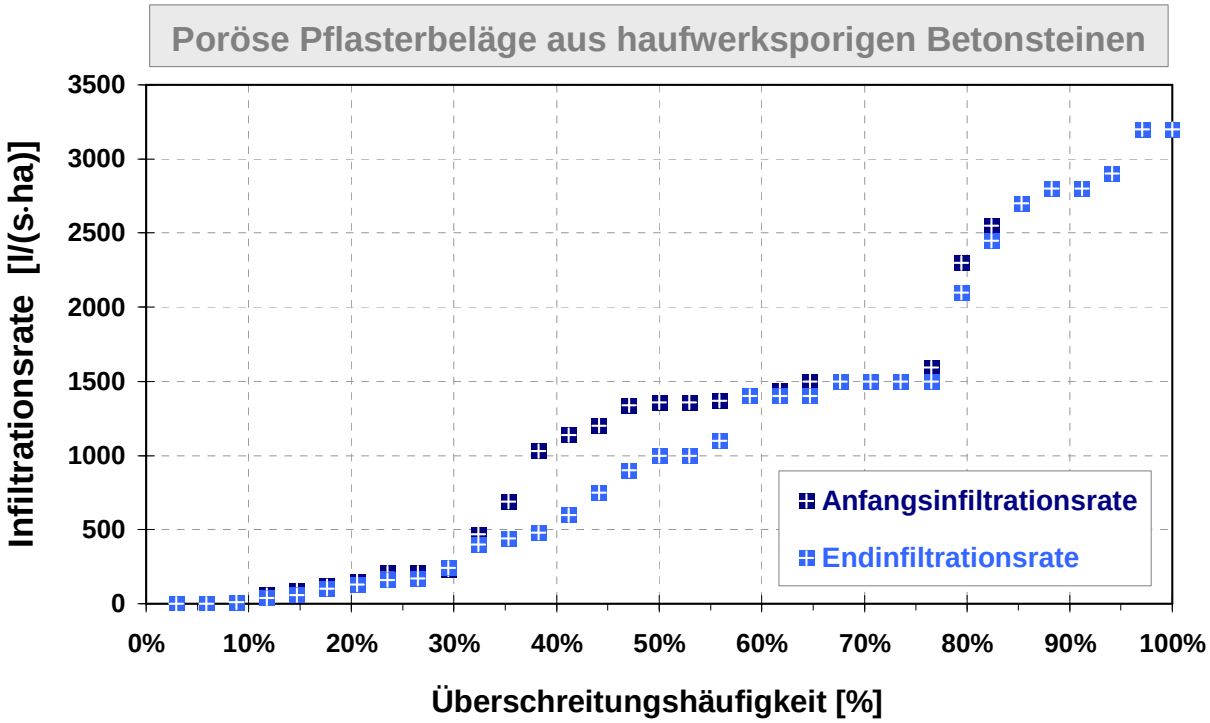


Abbildung A - 5: **Statische Überschreitungshäufigkeit der Infiltrationsleistung für poröse Pflasterbeläge aus haufwerksporigen Betonsteinen[133]**

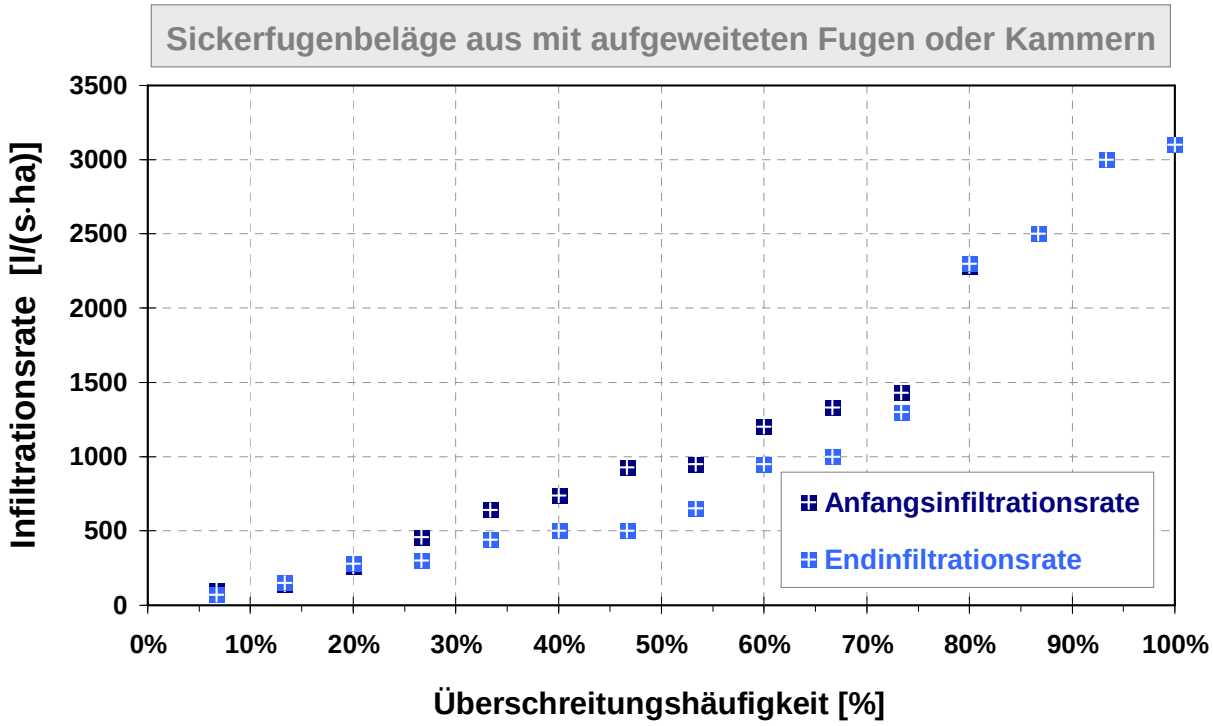


Abbildung A - 6: **Statische Überschreitungshäufigkeit der Infiltrationsleistung für Pflasterbeläge mit aufgeweiteten Sickerfugen oder Kammern[134]**

[133] abgeleitet aus Messdaten von Nolting et al. (2005) an 34 Flächenbelägen bzw. Messpunkten

Anhang A-4: Verwendete Messtechnik

1. Zwei Tauchpumpen im Wasservorratsbehälter
2. Gedükerte Durchflussmesser (Flügelradmesser, Messgenauigkeit ± 3 %)
3. Plexiglas-Wanne mit 625 Injektionsnadeln an der Unterseite
4. Stahlring, ∅ = 54 cm, Fläche ca. 0,25 m², Höhe ca. 5 cm
5. Näherungssensor zur Bestimmung des Wasserstandes

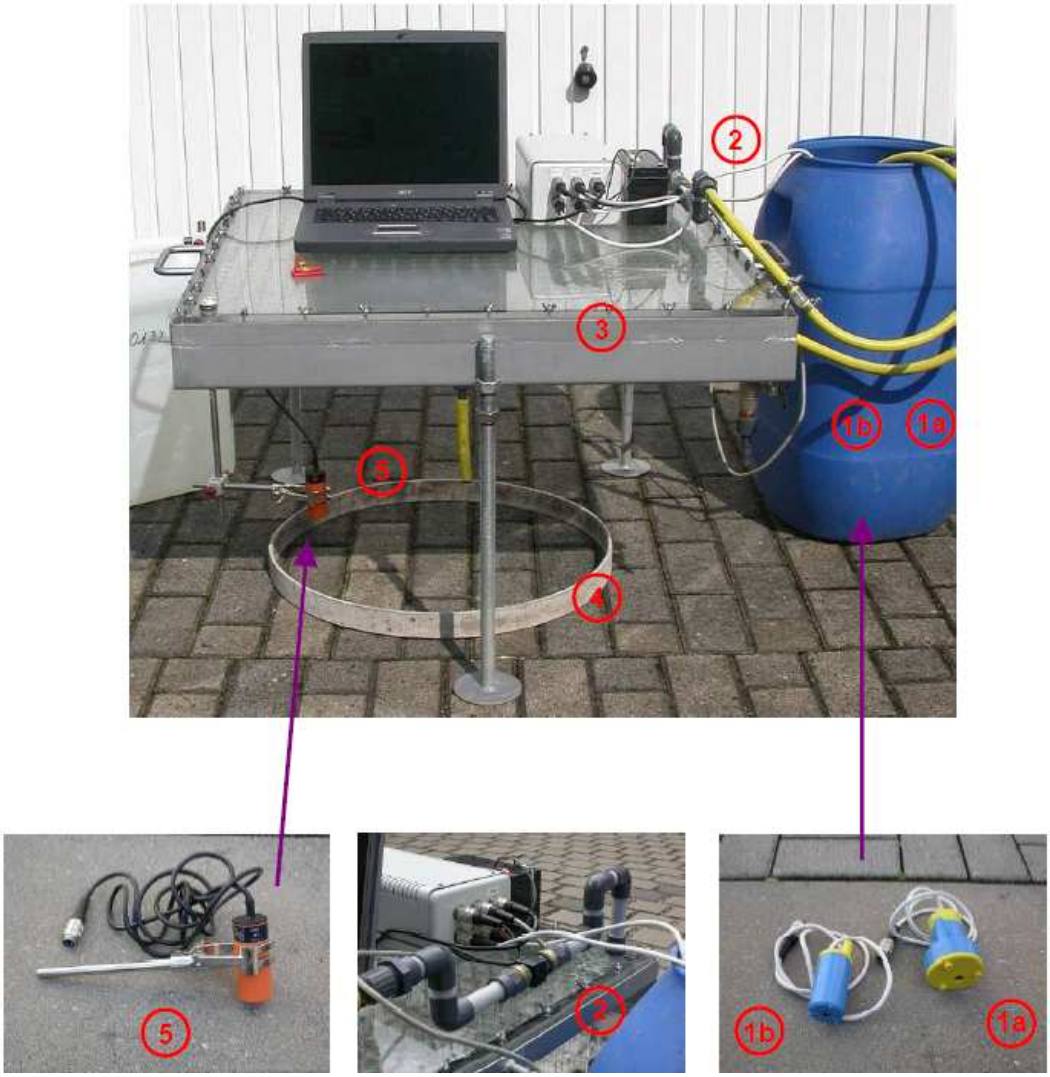


Abbildung A - 7: Tropfinfiltrometer[135]

134 abgeleitet aus Messdaten von Nolting et al. (2005) an 15 Flächenbelägen bzw. Messpunkten

135 aus Nolting et al. (2005)



Abbildung A - 8: **Prüfanlage 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 Versuchsanlage**

- **(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-5: Messerwertdarstellung Infiltrometertest

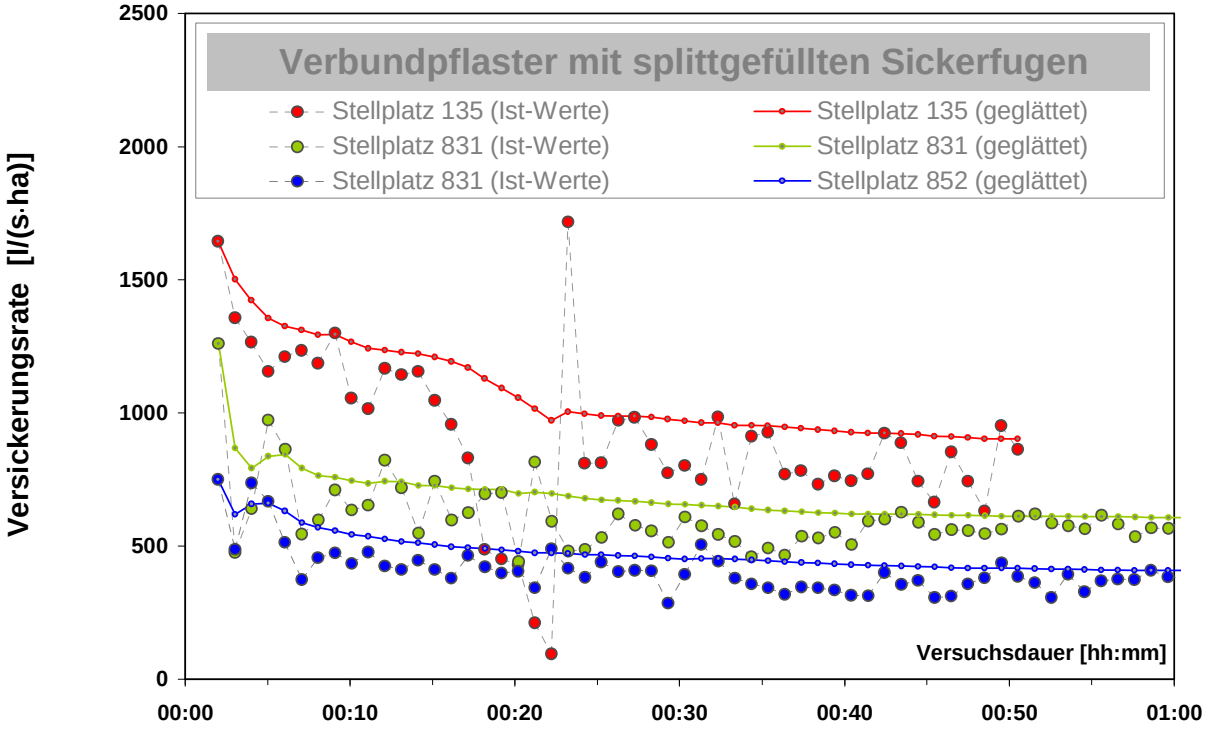


Abbildung A - 10: Gegenüberstellung der Ganglinienverläufe von Ist-Werten und fortlaufenden Mittelwerten der Versickerungsrate am Beispiel der Messwerte des Untersuchungsstandorts Gelsenkirchen

Anhang A-6: Matrizes der durchgeführten Versuchsserien

Flächencharakteristik		Niederschlagsbelastung (Beregnungscharakteristik)											
Gefälle	Quarzmehl	konstante Beregnungsintensität [l/(s·ha)]											Infiltr.-test
		50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
2,5%	—				3x					3x			
	500 g/m²												
	1000 g/m²												
	2000 g/m²												

Abbildung A - 11: Versuchsmatrix der Versuchsserie 1 an Sickerfugenpflaster mit splittverfüllten Fugen (Fugenweite 10 mm)136

Flächencharakteristik			Niederschlagsbelastung (Beregnungscharakteristik)										
Gefälle	Kolmationsgrad	Quarzmehl	konstante Beregnungsintensität [l/(s·ha)]										Infiltr.-test
			25	50	75	100	150	200	300	500	750	1000	
2,5%	Neuzustand	—				4 x		4 x		2 x			
	starke Kolmation	500 g/m²				5 x		2 x	2 x	4 x			2 x
	extreme Kolmation	750 g/m²				5 x		2 x	2 x	3 x			2 x

Abbildung A - 12: Versuchsmatrix der Versuchsserie 2 an fugenarmem Rechteckpflaster

136 dunkel markierte Felder repräsentieren jeweils einen oder mehrere Tests für die jeweilige Beregnungsintensität

Flächencharakteristik			Niederschlagsbelastung (Beregnungscharakteristik)											
Gefälle	Kolmationsgrad	Quarzmehl	konstante Beregnungsintensität [l/(s·ha)]										Infiltr.-test	Modellregen Euler Typ II (n = 0,2 a^{-1})
			25	50	75	100	150	200	300	500	750	1000		
2,5%	Neuzustand	—					3 x							
	mäßige Kolmation	200 g/m²				4 x	4 x	2 x						
	ausgeprägte Kolmaltion	400 g/m²				4 x	4 x							
	starke Kolmation	500 g/m²				2 x	4 x							
5,0%	Neuzustand	—												
	mäßige Kolmation	500 g/m²				2 x								
	ausgeprägte Kolmaltion	750 g/m²				2 x								
7,5%	Neuzustand	—												
	mäßige Kolmation	500 g/m²				2 x								
	ausgeprägte Kolmaltion	750 g/m²				2 x								

Abbildung A - 13: Versuchsmatrix der Versuchsserie 3 an fugenarmem Doppelverbundpflaster

Flächencharakteristik		Niederschlagsbelastung (Beregnungscharakteristik)										
Gefälle	Quarzmehl	konstante Beregnungsintensität [l/(s·ha)]										Infiltr.-test
		25	50	75	100	150	200	300	500	750	1000	
2,5%	—							2 x				
	500 g/m²											
	1000 g/m²											
	1500 g/m²											
	2000 g/m²							2 x				
	3000 g/m²											
	4000 g/m²											
	8600 g/m²											

Abbildung A - 14: Versuchsmatrix der Versuchsserie 4 an Sickerfugenpflaster mit splittverfüllten Fugen (Fugenweite 10 mm)

Flächencharakteristik			Niederschlagsbelastung (Beregnungscharakteristik)								
Versuchs-reihe	Belagstyp	Quarzmehl / Untergrund	konstante Beregnungsintensität [l/(s·ha)]								
			25	50	75	100	200	300	500	750	1000
VR 5.1	**Doppelverbund-Pflaster fugenarm** 2,5% Gefälle ohne Tragschicht	—									
		200 g/m²									
		400 g/m²									
VR 5.2 VR 5.4	**Schottertragschicht** ohne Deckbelag	homogene Tragschicht									
		Tragschicht auf hydr. Sperrschicht									
VR 5.5	**Rechteck-Betonpflaster mit 10 mm Sickerfuge** 2,5% Gefälle ohne Tragschicht	—									
		1000 g/m²									
		2000 g/m²									
VR 5.6	**Rechteck-Betonpflaster mit 7 mm Sickerfuge** 2,5% Gefälle ohne Tragschicht	—									
		500 g/m²									
		1000 g/m²									
VR 5.7	**poröses Betonpflaster fugenarm** 2,5% Gefälle ohne Tragschicht	—									
		500 g/m²									
		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** 2,5% Gefälle ohne Tragschicht auf Splitt	—									
		400 g/m²									

Abbildung A - 15: Versuchsmatrix der Versuchsserie 5 an verschiedenen Deckbelägen und an Schotterschichten in singulärer Aufstellung

Flächencharakteristik			Niederschlagsbelastung (Beregnungscharakteristik)								
Gefälle	Kolmationsgrad	Quarzmehl	konstante Beregnungsintensität [l/(s·ha)]								
			50	100	150	200	300	400	500	600	800	1000
7,5%	Neuzustand	—										

Abbildung A - 16: Versuchsmatrix der Versuchsserie 6 an fugenarmem Porenbeton-pflaster mit hohem Gefälle

Flächencharakteristik			Niederschlagsbelastung (Beregnungscharakteristik)				
Versuchs-reihe	Belagstyp	Quarzmehl	konstante Beregnungsintensität [l/(s·ha)]				
			100	200	300	400	500
VS 7.2	**Plattebelag** **Fugenanteil 0,6%** Betonplatten 50x50x5 cm	—					
		500 g/m²					
VS 7.1	**Plattebelag** **Fugenanteil 1,2%** Betonplatten 40x40x5 cm	—					
		500 g/m²					
VS 7.3	**Plattebelag** **Fugenanteil 1,8%** Betonplatten 30x30x5 cm	—					
		500 g/m²					
VS 7.4	**Plattebelag (Fugenanteil 1,8%)** Tragschicht auf Sperrschicht	**500 g/m²**					

Abbildung A - 17: Versuchsmatrix der Versuchsserie 7 an fugenarmen Plattenbelägen mit unterschiedlichen Fugenanteilen

Anhang A-7: Sieblinien der verwendeten Materialgemische

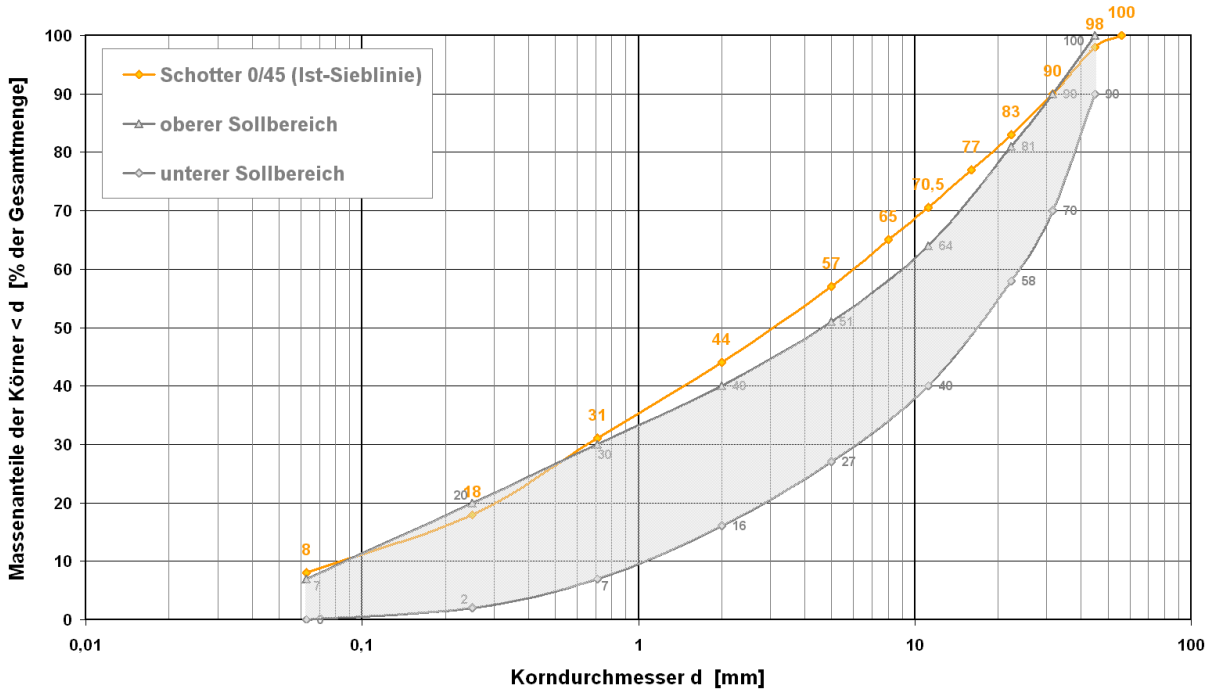


Abbildung A - 18: Sieblinie des als Tragschichtmaterial verwendeten Korngemisches

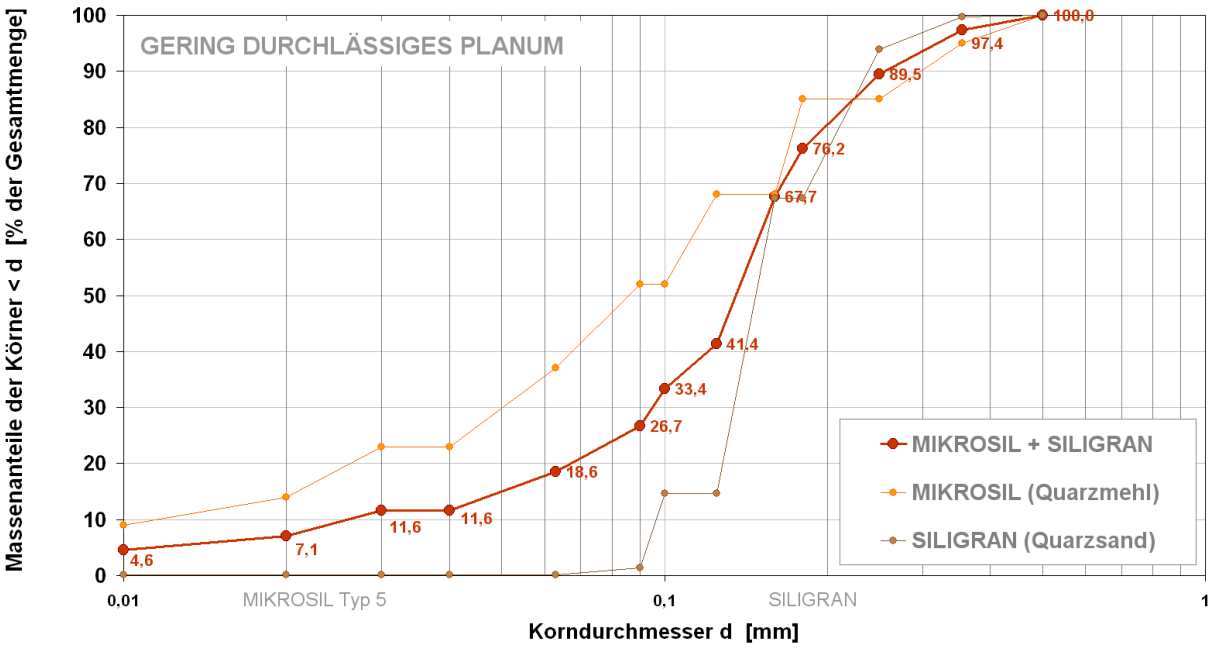


Abbildung A - 19: Sieblinie des zur Herstellung eines gering durchlässigen Planums verwendeten Korngemisches aus 50% Quarzsand und 50% Quarzmehl

Anhang A-8: Messwerte der Versuchsserie 7 an Plattenbelägen unterschiedlichen Formats

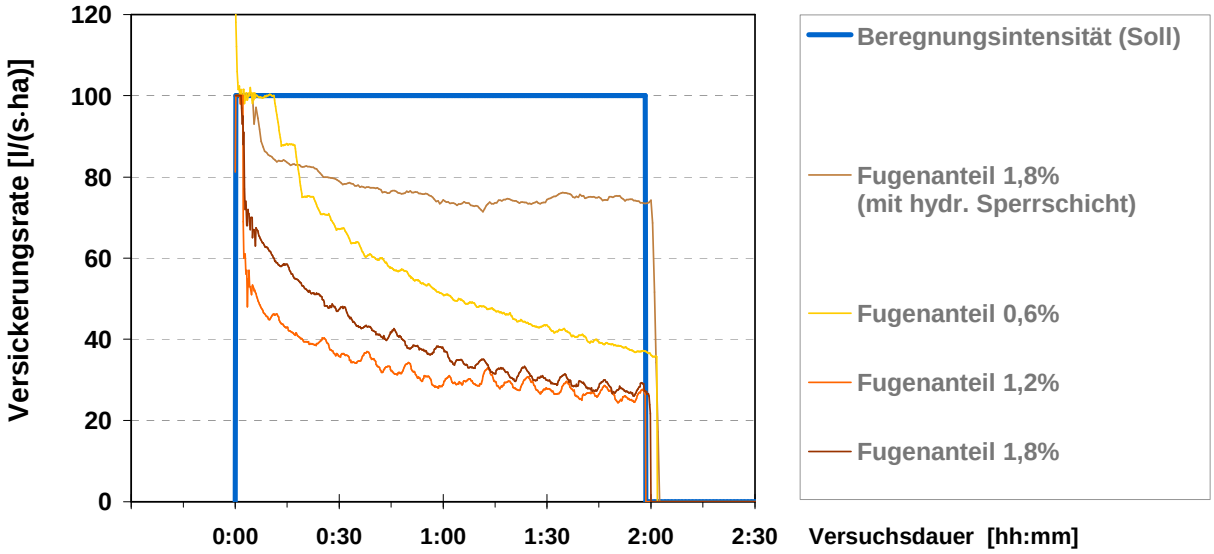


Abbildung A - 20: Rückgang der Infiltrationsraten während des Einspülvorganges bei den untersuchten Plattenbelägen (Versuchsserie 7)

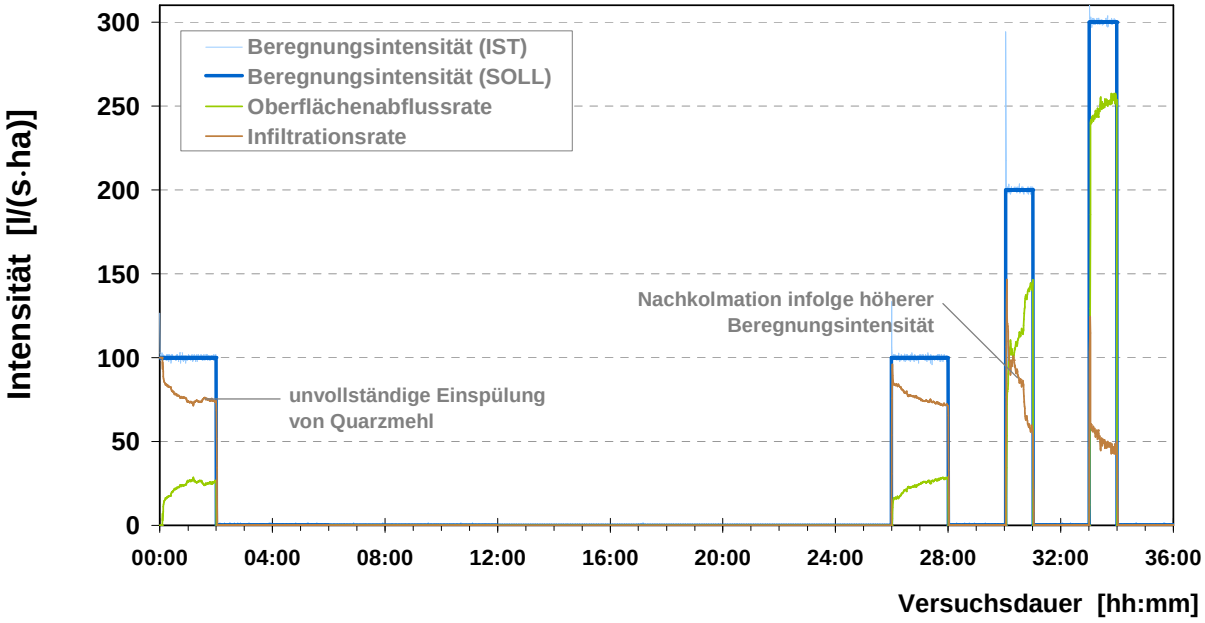


Abbildung A - 21: Messergebnisse des Versuchs V7.4a mit unvollständiger Kolmatierung des Plattenbelages auf gering durchlässigem Planum

Anhang A-9: Regressionskurven der Infiltrationsrate in Abhängigkeit von der Beregnungsdauer

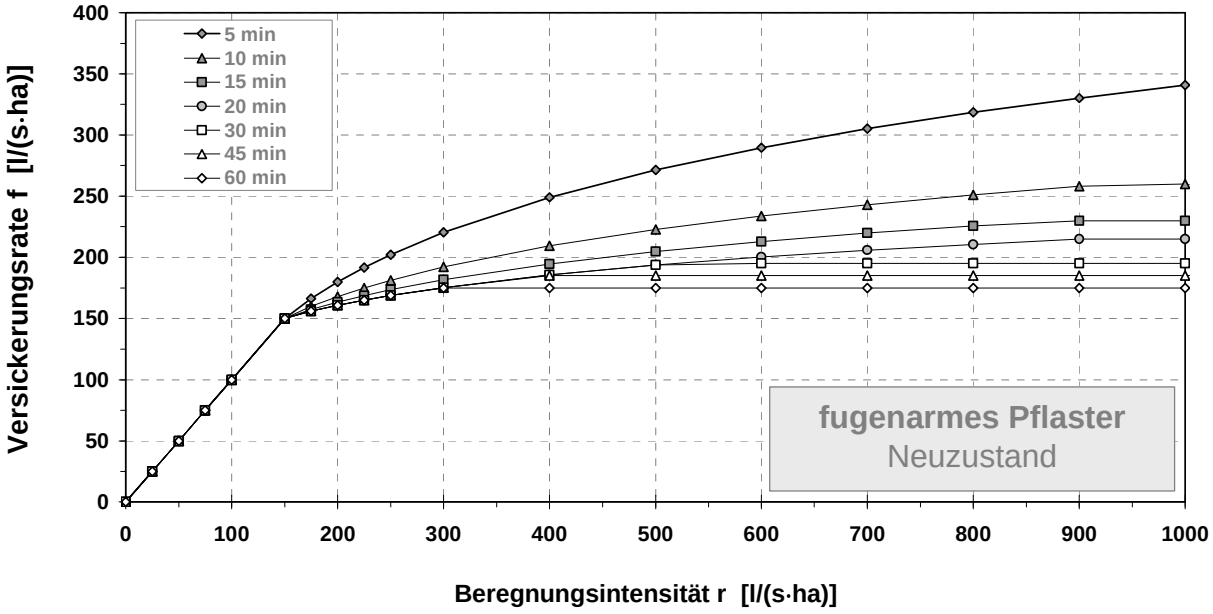


Abbildung A - 22: Regressionskurven für fugenarmes Pflaster aus gefügedichten Betonsteinen bei 2,5% Gefälle im Neuzustand

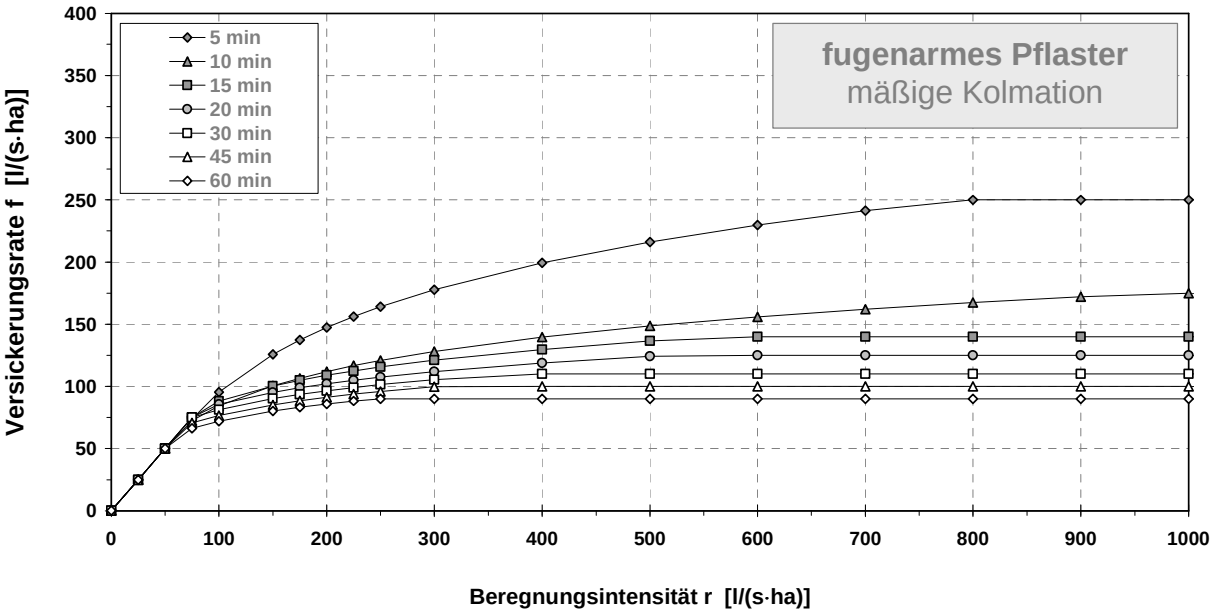


Abbildung A - 23: Regressionskurven für fugenarmes Pflaster aus gefügedichten Betonsteinen bei 2,5% Gefälle und mäßiger Kolmation

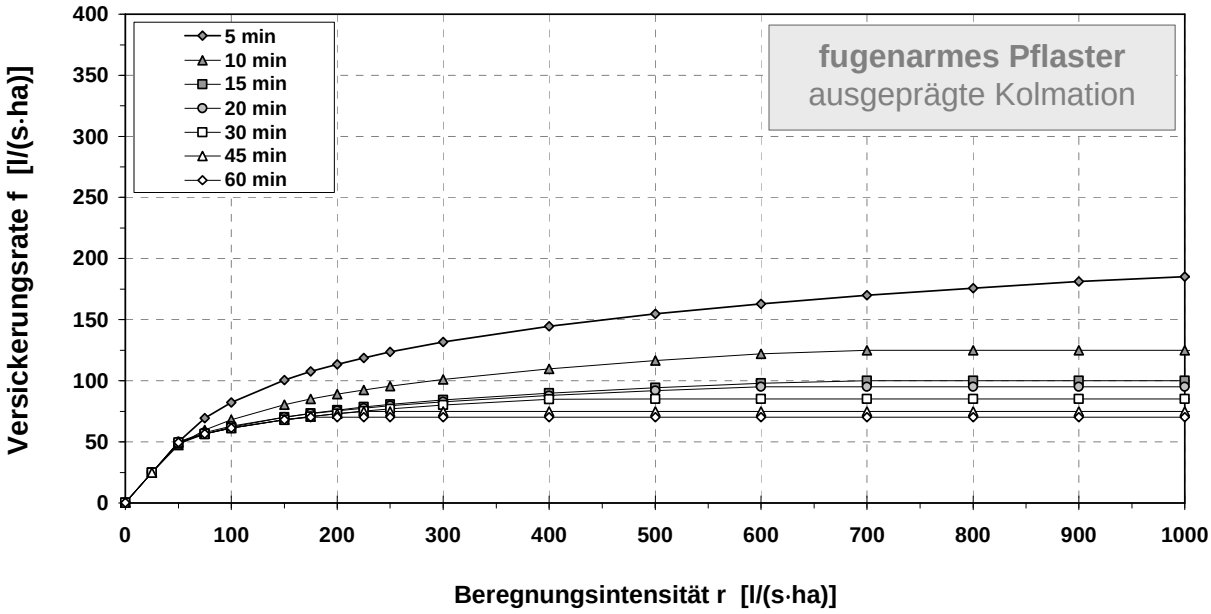


Abbildung A - 24: Regressionskurven für fugenarmes Pflaster aus gefügedichten Betonsteinen bei 2,5% Gefälle und ausgeprägter Kolmation

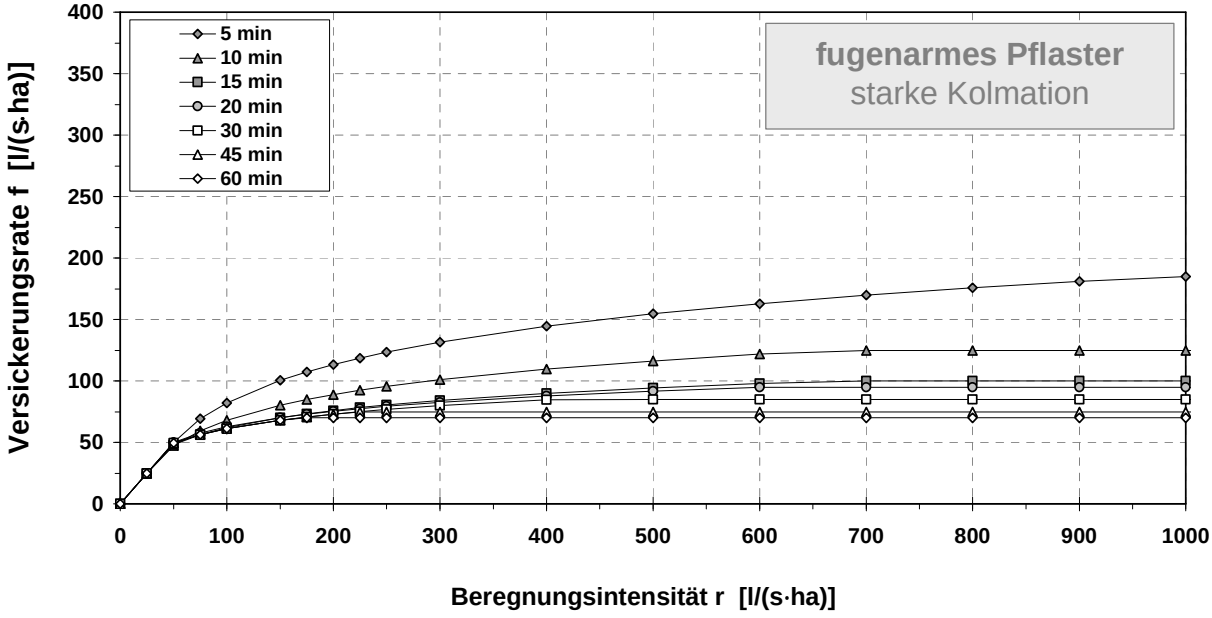


Abbildung A - 25: Regressionskurven für fugenarmes Pflaster aus gefügedichten Betonsteinen bei 2,5% Gefälle und starker Kolmation

Anhang A-10: Korrelation der Regressionsparameter 1. Ordnung

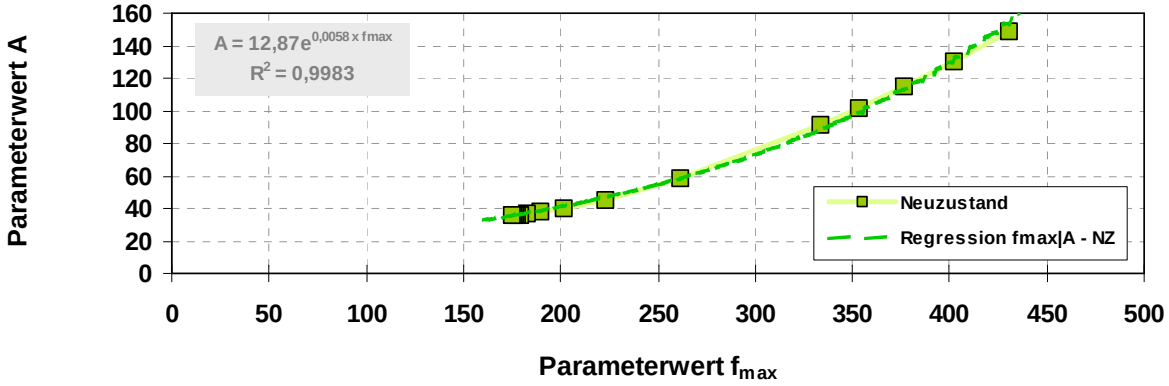


Abbildung A - 26: Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und f_{max} für einen Flächenbelag im Neuzustand

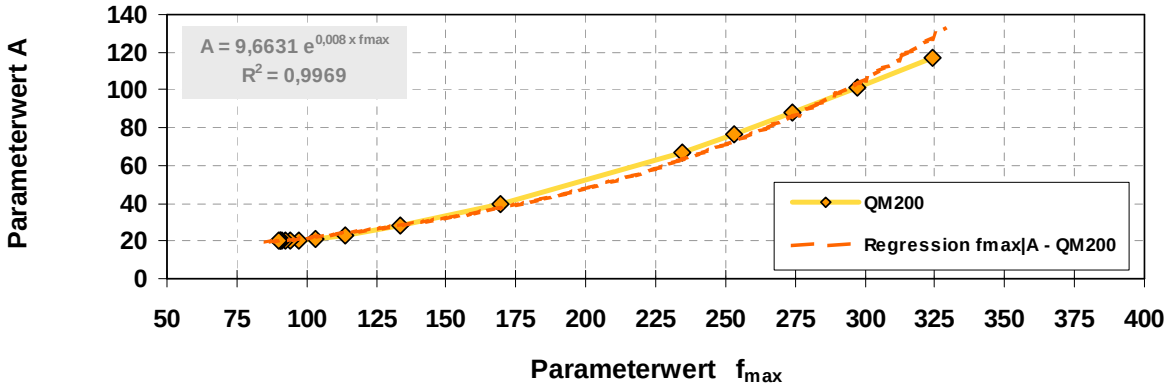


Abbildung A - 27: Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und f_{max} für einen Flächenbelag mit mäßigem Kolmationsgrad

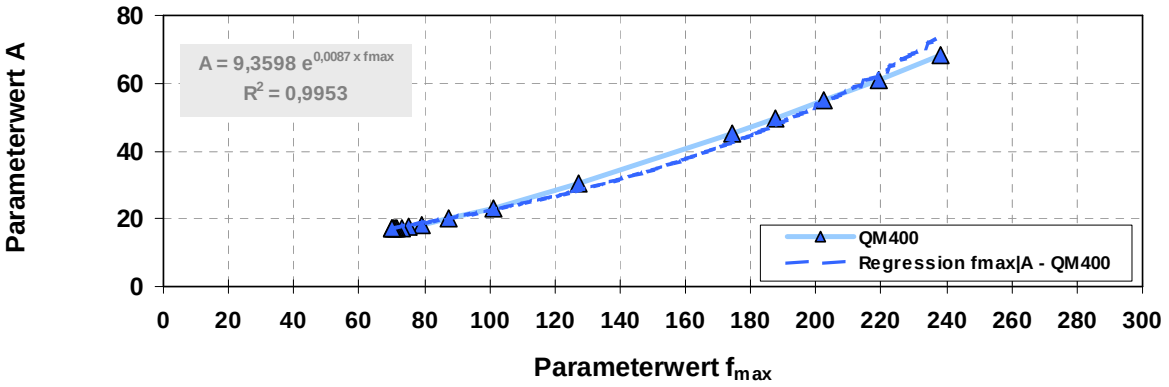


Abbildung A - 28: Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und f_{max} für einen Flächenbelag mit ausgeprägtem Kolmationsgrad

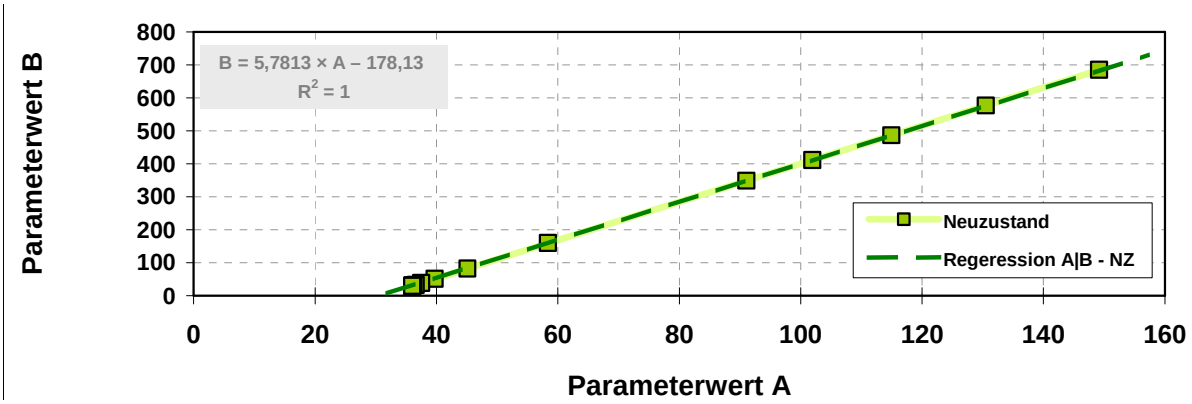


Abbildung A - 29: Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und B für einen Flächenbelag im Neuzustand

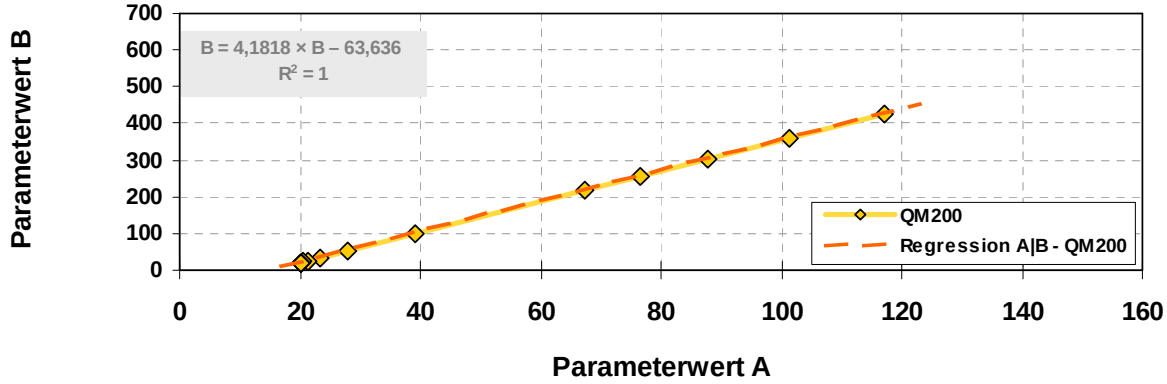


Abbildung A - 30: Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und B für einen Flächenbelag mit mäßigem Kolmationsgrad

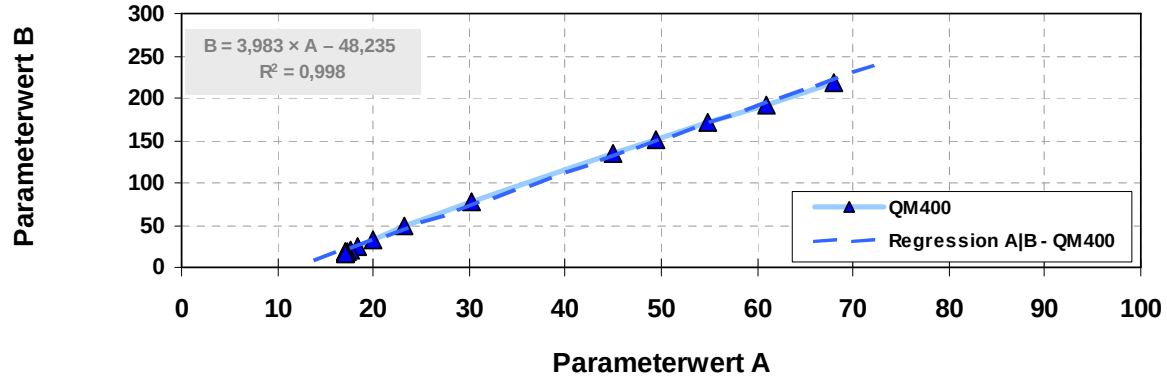


Abbildung A - 31: Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und B für einen Flächenbelag mit ausgeprägtem Kolmationsgrad

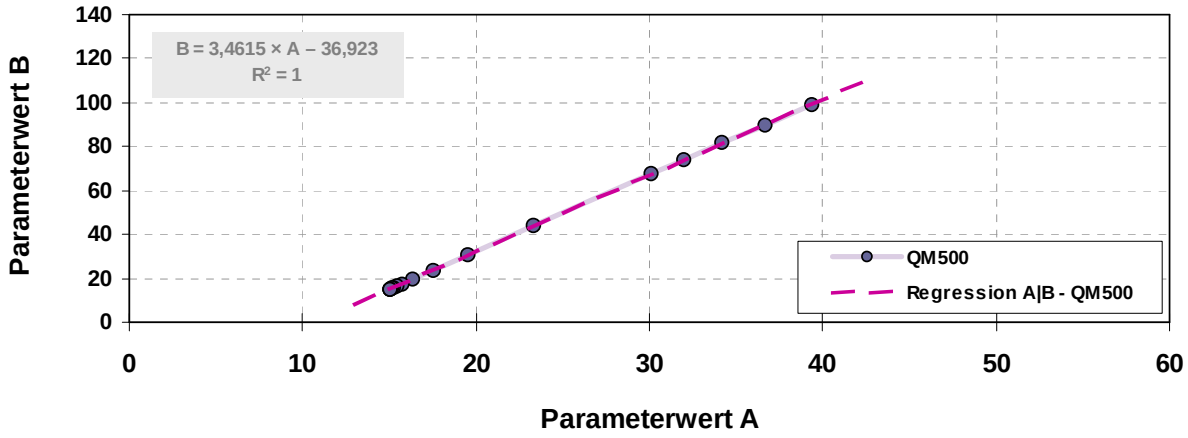


Abbildung A - 32: **Korrelation zwischen den Regressionsparametern A und B für einen Flächenbelag mit starkem Kolmationsgrad**

Anhang A-11: Abminderungsfaktoren im Modellansatz

Tabelle A - 10: Vorschlag zur Höhe von Abminderungsfaktoren ζ_{TP} zur Berücksichtigung der Vorgeschichte eines Regenereignisses

Regendauer [min]	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

Anhang A-12: Infiltrationsrate in Abhängigkeit der Regenhöhe

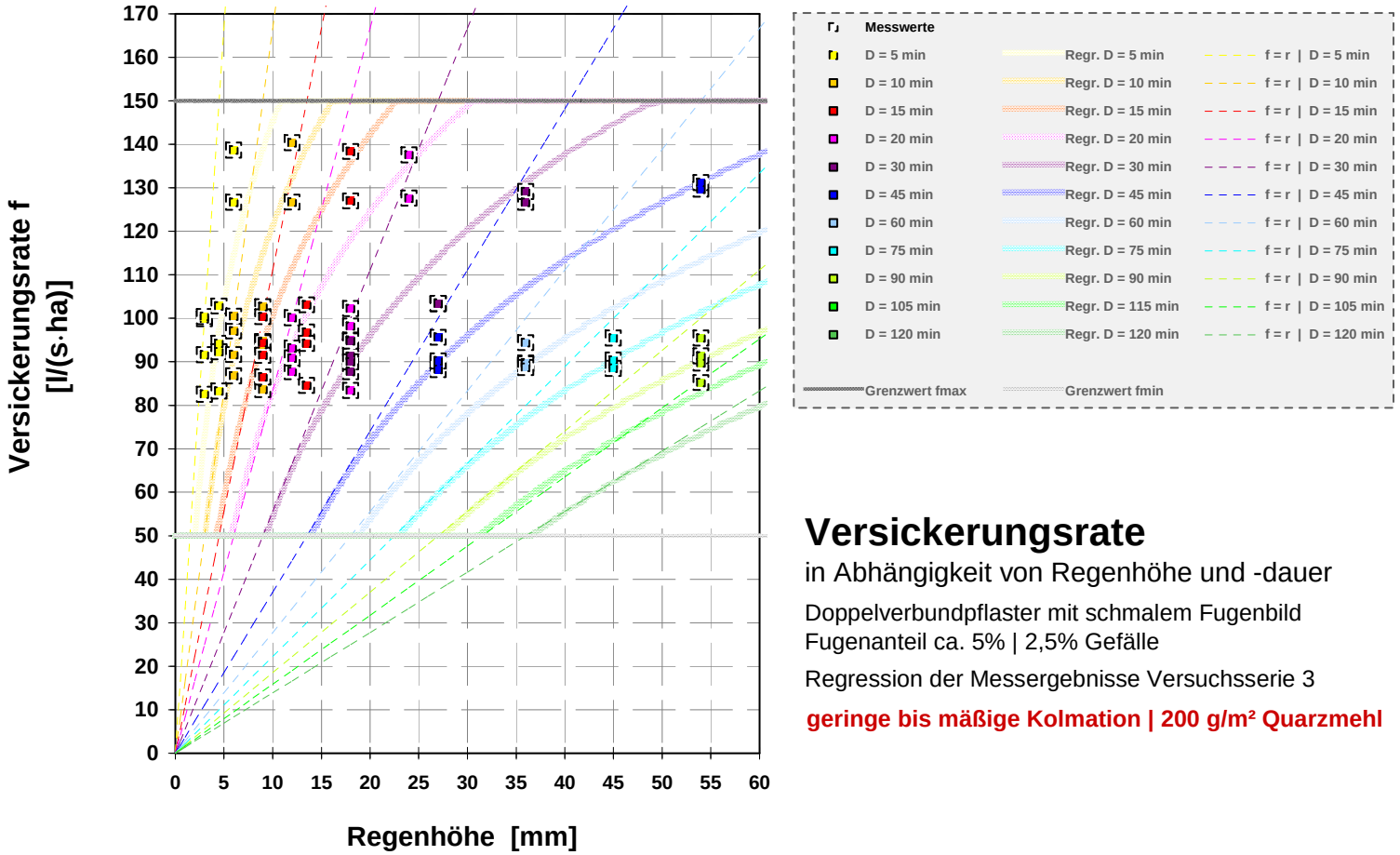


Abbildung A - 33: **Infiltrationsrate in Abhängigkeit vo der kumulativen Niederschlagshöhe und der Regendauer am Beispiel eines fugenarmen Pflasterbelages mit mäßiger Kolmation**

Anhang A-13: Empfehlung flächenspezifischer Anfangsverlusthöhen

Tabelle A - 11: Anfangsverlusthöhen durchlässig befestigter Flächentypen

Flächentyp			Anfangsverlusthöhe [mm]	
Befestigungsart	**Fugenanteil**	**Fugenmaterial**	**Literatur**	**Empfehlung**
Plattenbelag, fugenarm	≤ 3%	Sand	2,0	2,5
Pflasterbelag, fugenarm	3%-6%	Sand	2,0	2,5
Pflasterbelag, fugenreich	6%-12%	Sand	3,0	3,0
Pflasterbelag mit 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