



# DIPLOMARBEIT

ZUM THEMA

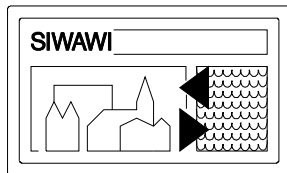
## *Überprüfung von Standard-Abflussbeiwerten durch Niederschlag-Abfluss- Simulation*

---

CAND. ING. MARC ILLGEN

BETREUER: DIPL. ING. U. DITTMER  
PROF. DR.-ING. T. G. SCHMITT

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN



Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN

---

## Diplomarbeit für

Herrn cand. ing. Marc Illgen

# Überprüfung von Standard-Abflussbeiwerten durch Niederschlag- Abfluss-Simulation

Abflussbeiwerte dienen zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Niederschlagsbelastung und Oberflächenabfluss. In der Erarbeitung ATV-Arbeitsblatt „Bemessungsgrundlagen für Abwasseranlagen“ wird für verschiedene Anwendungen im ATV-Regelwerk die Verwendung von Abflussbeiwerten erörtert, je nach Anwendung in der Bedeutung als

- Spitzenabflussbeiwert  $\psi_s$ ,
- mittlerer Abflussbeiwert  $\psi_m$  (Einzelereignis oder Jahresmittelwert)
- Endabflussbeiwert  $\psi_e$

Hierzu werden in verschiedenen Richtlinien und Merkblättern Standardwerte für unterschiedliche Flächentypen angegeben (siehe z.B. DIN EN752, ATV A118, ATV M153). Bei der detaillierten Abfluss- und Schmutzfrachtsimulation ergibt sich dagegen der abflusswirksame Niederschlag durch die mathematische Nachbildung der Teilprozesse der Abflussbildung. Dabei werden Verluste durch Benetzung, Verdunstung, Muldenauffüllung sowie durch Versickerung berücksichtigt, für die Modellparameter vorzugeben sind.

Herr Illgen erhält im Rahmen seiner Diplomarbeit die Aufgabe die Kompatibilität von Ergebnissen der Abflusssimulation mit den empfohlenen Standardwerten zu untersuchen. Hierzu soll mit Hilfe des Schmutzfracht- und Abflussmodells KOSMO die Abflussbildung auf unterschiedlichen Flächenarten unter unterschiedlichen Niederschlagsbelastungen simuliert werden.

Hierzu ist zunächst eine Literaturlauswertung hinsichtlich Abflussbeiwerten und Modellparametern zur Abflussbildung durchzuführen. Ausgehend von den verfügbaren Daten sind für unterschiedliche definierte Flächentypen Modellparameter für die einzelnen Verlustkomponenten zu ermitteln. Es soll zunächst das Abflussverhalten auf Einheitsflächen unterschiedlicher Beschaffenheit untersucht werden. Anschließend sind Abflussberechnungen für ein Einzugsgebiet mit einer typischen Zusammensetzung unterschiedlicher Flächenarten durchzuführen. In beiden Fällen sollen Niederschlagsbelastungen unterschiedlicher Art und Intensität simuliert werden (Blockregen, Modellregen, Regenreihe). Es sind jeweils die resultierenden Abflussbeiwerte auszuweisen und mit empfohlenen Standardwerten zu vergleichen. Ausgehend von dieser Gegenüberstellung ist die Frage der Kompatibilität der Standardwerte mit der Abflussberechnung zu diskutieren.

Herr Illgen erhält einführende Literaturhinweise sowie eine Einarbeitung in die Anwendung des Schmutzfrachtmodells KOSMO durch den Unterzeichner. Die zur Durchführung der Simulati-

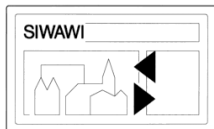
onsrechnungen erforderlichen Datensätze werden vom Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft zur Verfügung gestellt.

Kaiserslautern , den 26.6.2000

Prof. Dr.-Ing. T.G. Schmitt

Ausgabe: 27.6. 2000

Abgabe: 27.9. 2000



*Name des Diplomanden*

*Matrikelnummer*

**Marc Illgen**

**329 445**

***Versicherung der selbständigen Anfertigung der Diplomarbeit***

Hiermit versichere ich, dass ich die nachfolgende Diplomarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Mir ist bekannt, dass die Arbeit Eigentum des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern ist und dass sie nicht ohne Einverständnis des Fachgebietes an Dritte weitergegeben werden darf.

Zur Veröffentlichung der Ergebnisse der Arbeit ist ebenfalls die Zustimmung des Betreuers / der Betreuerin erforderlich.

Kaiserslautern, den 25.09.2000

.....

## Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Untersuchung soll die Kompatibilität von Ergebnissen der Abflusssimulation mit empfohlenen Standardwerten anhand von Modellrechnungen untersucht werden. Unter Vorgabe in der Literatur empfohlener Modellparameter zur Abflussbildung wurden für verschiedene Niederschlagsbelastungen der Oberflächenabfluss berechnet und hinsichtlich der verschiedenen Abflussbeiwerte (mittlerer Abflussbeiwert, Endabflussbeiwert und Spitzenabflussbeiwert) ausgewertet. Es konnte gezeigt werden, dass die Verwendung von Abfluss- und Schmutzfrachtmodellen in der Siedlungsentwässerung zur Berechnung und Bewertung des Abflussverhaltens von Entwässerungsflächen zutreffende Ergebnisse liefert und grundsätzlich empfohlen werden kann.

## Summary

With the submitted study the compatibility of results of the discharge simulation with recommended standard values is to be examined on the basis of model calculations. Under specification of recommended parameters for discharge formation for different precipitation loads the surface discharge was calculated and analysed regarding the different runoff coefficients (total runoff coefficient  $\psi_m$ , final runoff coefficient  $\psi_e$  and peak runoff coefficient  $\psi_S$ ). It could be shown that the use of discharge and pollution load simulation models supplies applicable results and can be basically recommended in the urban drainage for the calculation and evaluation of the discharge characteristics of drainage surfaces.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. EINLEITUNG</b>	<b>1-1</b>
1.1 HINTERGRUND UND PROBLEMSTELLUNG	1-1
1.2 ZIELSETZUNG	1-2
1.3 VORGEHENSWEISE	1-2
<b>2. BEGRIFFSBESTIMMUNG "ABFLUSSBEIWERT"</b>	<b>2-1</b>
2.1 DER SPITZENABFLUSSBEIWERT $\psi_S$	2-1
2.2 DER MITTLERE ABFLUSSBEIWERT $\psi_M$	2-2
2.3 DER ENDABFLUSSBEIWERT $\psi_E$	2-2
<b>3. ABFLUSSBEIWERTE IN DER LITERATUR</b>	<b>3-1</b>
3.1 NORMEN UND TECHNISCHE REGELWERKE	3-1
3.1.1 DIN 1986 (1995) ENTWÄSSERUNGSANLAGEN FÜR GEBÄUDE UND GRUNDSTÜCKE	3-1
3.1.2 DIN EN 752 (1996)	3-1
3.1.3 ATV-ARBEITSBLATT A 118 (1999)	3-3
3.1.4 ATV-MERKBLATT M 153 (2000)	3-4
3.1.5 VERÖFFENTLICHUNG VON BORGWARDT ZUM ABFLUSSBEIWERT NACH DIN 1986	3-5
3.2 UNTERSUCHUNGEN VON PFLASTERFLÄCHEN	3-7
3.2.1 UNTERSUCHUNG VON BORGWARDT ZUR VERSICKERUNG AUF PFLASTERFLÄCHEN	3-7
3.2.2 UNTERSUCHUNGEN VON MUTH ZUR VERSICKERUNG AUF BETONSTEINPFLASTER	3-11
3.2.3 UNTERSUCHUNG VON HANSES ET AL. ZUM VERHALTEN VON WASSERDURCHLÄSSIGEM PFLASTER AUF GERING DURCHLÄSSIGEM UNTERGRUND	3-16
3.3 UNTERSUCHUNG VON DACHBEGRÜNUNGEN	3-17
3.3.1 UNTERSUCHUNG VON LIESECKE ZUM RETENTIONSVERMÖGEN VON DACHBEGRÜNUNGEN	3-17
3.3.2 UNTERSUCHUNG VON KOLB	3-19
3.4 ZUSAMMENFASSUNG	3-20
<b>4. ABFLUSSMODELL UND MODELLANSÄTZE ZUR BERECHNUNG DES OBEFLÄCHEN-ABFLUSSES</b>	<b>4-1</b>
4.1 DAS ABFLUSS- UND SCHMUTZFRACHTMODELL KOSMO	4-1
4.2 MODELLANSÄTZE ZUR BERECHNUNG DES OBERFLÄCHENABFLUSSES	4-2
4.2.1 ABFLUSSBILDUNG	4-2
4.2.2 ABFLUSSKONZENTRATION	4-6

---

**5. NIEDERSCHLAG-ABFLUSS-SIMULATION 5-1**

---

5.1	UNTERSUCHUNGSABLAUF	5-1
5.2	UNTERSUCHTE FLÄCHENTYPEN	5-1
5.3	ANGESETZTE PARAMETERWERTE ZUR BERECHNUNG DES OBERFLÄCHENABFLUSSES	5-3
5.4	BERECHNUNG DER ABFLUSSBEIWERTE	5-6
5.5	NIEDERSCHLAGSBELASTUNGEN	5-7
5.6	UNTERSUCHUNG VON EINHEITSFLÄCHEN	5-8
5.6.1	EINHEITSFLÄCHENUNTERSUCHUNG DES MITTLEREN ABFLUSSBEIWERTES UND DES ENDABFLUSSBEIWERTES	5-9
5.6.2	EINHEITSFLÄCHENUNTERSUCHUNG DES SPITZENABFLUSSBEIWERTES	5-17
5.6.3	FAZIT DER EINHEITSFLÄCHENUNTERSUCHUNG	5-24
5.7	UNTERSUCHUNG VON EINZUGSGEBIETEN	5-25
5.7.1	NIEDERSCHLAGSBELASTUNGEN	5-25
5.7.2	MODELLPARAMETER ZUR BERECHNUNG DES OBERFLÄCHENABFLUSSES	5-26
5.7.3	EINZUGSGEBIETS GEBIET 1 - LÄNDLICH BIS KLEINSTÄDTISCH STRUKTURIERTES WOHN- GEBIET	5-26
5.7.4	EINZUGSGEBIET 2 - STÄDTISCHES KERNGEBIET	5-35
5.7.5	FAZIT DER UNTERSUCHUNG GANZER EINZUGSGEBIETE	5-42

---

**6. BETRACHTUNGEN ZUR GENAUIGKEIT DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE 6-1**

---

6.1	ALLGEMEINE UNSICHERHEITEN BEI DER ANWENDUNG VON ABFLUSSBEIWERTEN	6-1
6.2	UNSICHERHEITEN DER DURCHFÜHRTEN NIEDERSCHLAG-ABFLUSS-SIMULATIONEN	6-2
6.3	SENSITIVITÄTSANALYSE AUSGEWÄHLTER MODELLPARAMETER	6-3
6.3.1	SENSITIVITÄTSANALYSE DER MODELLPARAMETER ZUR VERSICKERUNG	6-3
6.3.2	SENSITIVITÄTSANALYSE DER GELÄNDENEIGUNG	6-5

---

**7. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE 7-1**

---

---

**8. FAZIT UND EMPFEHLUNGEN 8-1**

---

---

**9. LITERATURVERZEICHNIS 9-1**

---

---

**A. ANHANG A-1**

---

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1:	Spitzenabflussbeiwerte $\psi_S$ zur Ermittlung des Regenwasserabflusses nach DIN 1986/2 (1995) /Deutsches Institut für Normung e. V. - DIN; 1995/.....	3-2
Tabelle 3-2:	Spitzenabflussbeiwerte nach DIN EN 752 (1996) /Deutsches Institut für Normung e. V. - DIN; 1995/.....	3-3
Tabelle 3-3:	Empfohlene Spitzenabflussbeiwerte für unterschiedliche Regenspenden bei einer Regendauer von 15 Minuten ( $r_{15}$ ) in Abhängigkeit von der mittleren Geländeneigung IG und dem Befestigungsgrad (für Fließzeitverfahren, aus ATV-A 118, 1997) /ATV; 1999/ .....	3-4
Tabelle 3-4:	Empfohlene mittlere Abflussbeiwerte $\psi_m$ von Einzugsgebietsflächen für Berechnungen im Rahmen des Merkblattes M 153 /ATV; 2000/.....	3-5
Tabelle 3-5:	Vorschlag von Borgwardt für die Spitzenabflussbeiwerte $\psi_S$ /Borgwardt, 1994-b/	3-6
Tabelle 3-6:	Aufnehmbare Regenspenden verschiedener Pflasterflächen nach Muth .....	3-12
Tabelle 3-7:	Aus den Ergebnissen von Muth abgeleitete Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende .....	3-14
Tabelle 3-8:	Höchste aufgetretene Abflussbeiwerte während und nach einem Niederschlagsereignis von $r_{15} = 300$ l/s-ha /Liesecke; 1995/ .....	3-18
Tabelle 3-9:	Abgeleitete Spitzenabflussbeiwerte für Dachbegrünungen in Abhängigkeit von der Aufbaudicke bis 5 % Gefälle /Liesecke; 1998/ .....	3-19
Tabelle 3-10:	Überblick über die vorgestellten Untersuchungen.....	3-20
Tabelle 3-11:	Gegenüberstellung der Spitzenabflussbeiwerte der DIN 1986/2 und den Ergebnissen verschiedener Untersuchungen .....	3-21
Tabelle 4-12:	Reduzierungsfaktoren der sommerlichen Benetzungswerte /Schmitt, 2000/.....	4-2
Tabelle 4-13:	Mittlere Monatswerte der täglichen Verdunstung (VDR in mm/d) /Verworn, 1993/	4-3
Tabelle 5-1:	Übersicht der untersuchten Flächentypen.....	5-2
Tabelle 5-2:	Bodenarten und Parameter für den erweiterten Ansatz nach Horten /Paulsen, 1986/ .....	5-4
Tabelle 5-3:	Verlustparameter zur Simulation des Niederschlag-Abfluss-Verhaltens.....	5-5
Tabelle 5-4:	Blockregen und zugehörige Häufigkeiten.....	5-10
Tabelle 5-5:	Simulationsergebnisse aus Blockregenspektrum für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert .....	5-11
Tabelle 5-6:	Simulationsergebnisse aus Modellregenspektrum für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert .....	5-14
Tabelle 5-7:	Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert aus Langzeitsimulation einer neunmonatigen Niederschlagsreihe ( $h_N = 657$ mm entspricht $h_a = 800$ mm/a) ..	5-16
Tabelle 5-8:	Blockregenereignisse zur Berechnung von Spitzenabflussbeiwerten .....	5-17



Tabelle 5-9:	Richtwerte des mittleren Abflussbeiwertes, des Endabflussbeiwertes sowie des Spitzenabflussbeiwertes.....	5-19
Tabelle 5-10:	Simulationsergebnisse der Spitzenabflussbeiwerte für Starkregenspektrum .....	5-20
Tabelle 5-11:	Ergebnis der Anpassung der Versickerungsparameter an Spitzenabflussbeiwerte... 5-22	
Tabelle 5-12:	Simulationsergebnisse der Spitzenabflussbeiwerte für Starkregenspektrum mit neu angepassten Modellparametern.....	5-23
Tabelle 5-13:	Angesetzte Niederschlagsbelastungen zur Simulation fiktiver Einzugsgebiete ...	5-26
Tabelle 5-14:	Literaturangaben über prozentuale Flächenanteile für ländliche und kleinstädtische Wohngebiete und gewählte Flächenverteilung für EZG 1 - Szenario 1.....	5-28
Tabelle 5-15:	Gewählte Verteilung der Flächentypen für Einzugsgebiet 1 - Szenario 1 .....	5-29
Tabelle 5-16:	Flächengewichtete Mittelwerte $\psi_m$ , EZG 1, $\psi_e$ , EZG 1 und $\psi_S$ , EZG 1 für Einzugsgebiet 1 .....	5-30
Tabelle 5-17:	Simulationsergebnisse für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert für das ländlich strukturierte Einzugsgebiet 1 - Szenario 1 ("Realität") .....	5-31
Tabelle 5-18:	Simulationsergebnisse für den Spitzenabflussbeiwert für Einzugsgebiet 1 - Szenario 1 ("Realität") .....	5-32
Tabelle 5-19:	Angesetzte Verteilung der Flächentypen für Einzugsgebiet 1 - Szenario 2.....	5-33
Tabelle 5-20:	Simulationsergebnisse für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert für Einzugsgebiet 1 .....	5-34
Tabelle 5-21:	Simulationsergebnisse für den Spitzenabflussbeiwert für Einzugsgebiet 1 .....	5-35
Tabelle 5-22:	Literaturangaben über prozentuale Flächenanteile für städtische Kerngebiete /Dittmer, 1999/ und gewählte Flächenverteilung für EZG 2 - Szenario 1 .....	5-37
Tabelle 5-23:	Flächengewichtete Mittelwerte $\psi_m$ , EZG 2, $\psi_e$ , EZG2 und $\psi_S$ , EZG2 für Einzugsgebiet 2.....	5-38
Tabelle 5-24:	Simulationsergebnisse für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert für innerstädtisches Einzugsgebiet 2 - Szenario 1 ("Realität") .....	5-38
Tabelle 5-25:	Simulationsergebnisse für den Spitzenabflussbeiwert für innerstädtisches Einzugsgebiet 2 - Szenario 1 ("Realität").....	5-39
Tabelle 5-26:	Angesetzte Verteilung der Flächentypen für Einzugsgebiet 2 - Szenario 2.....	5-40
Tabelle 5-27:	Simulationsergebnisse für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert für Einzugsgebiet 2.....	5-41
Tabelle 5-28:	Simulationsergebnisse für den Spitzenabflussbeiwert für Einzugsgebiet 2 .....	5-42
Tabelle 6-1:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Versickerungsparameter .....	6-4
Tabelle 6-2:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Geländeneigung .....	6-6
Tabelle A-1:	Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Blockregenereignis der Dauer 1 h und einer Niederschlagshöhe von 10 mm (n = 2 a-1) .....	A-1
Tabelle A-2:	Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Blockregenereignis der Dauer 1 h und einer Niederschlagshöhe von 15 mm (n = 1 a-1) .....	A-2

---

Tabelle A-3:	Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Blockregenereignis der Dauer 1 h und einer Niederschlagshöhe von 20 mm ( $n = 0,5 \text{ a}^{-1}$ ) .....	A-3
Tabelle A-4:	Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Blockregenereignis der Dauer 2 h und einer Niederschlagshöhe von 20 mm ( $n = 0,5 \text{ a}^{-1}$ ) .....	A-4
Tabelle A-5:	Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Blockregenereignis der Dauer 2 h und einer Niederschlagshöhe von 25 mm ( $n = 0,25 \text{ a}^{-1}$ ) .....	A-5
Tabelle A-6:	Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Blockregenereignis der Dauer 2 h und einer Niederschlagshöhe von 35 mm ( $n = 0,1 \text{ a}^{-1}$ ) .....	A-6
Tabelle A-7:	Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Modellregenereignis der Dauer 1 h und einer Niederschlagshöhe von 15 mm ( $n = 1 \text{ a}^{-1}$ ) .....	A-7
Tabelle A-8:	Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Modellregenereignis der Dauer 2 h und einer Niederschlagshöhe von 25 mm ( $n = 0,3 \text{ a}^{-1}$ ) .....	A-8
Tabelle A-9:	Spitzenabflussbeiwert für zehnminütige Blockregenereignisse .....	A-9
Tabelle A-10:	Spitzenabflussbeiwert für 15-minütige Blockregenereignisse .....	A-10
Tabelle A-11:	Spitzenabflussbeiwert für 20-minütige Blockregenereignisse .....	A-11
Tabelle A-12:	Berechnungsergebnisse für Einzugsgebiete 1 – Szenario1 für ein zweistündiges Blockregenereignis mit einer Niederschlagshöhe von 25 mm .....	A-12
Tabelle A-13:	Berechnungsergebnisse für Einzugsgebiete 1 – Szenario1 für ein zweistündiges Modellregenereignis mit einer Niederschlagshöhe von 25 mm .....	A-13

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1:	qualitativer Zusammenhang zwischen Regenintensität, Regendauer und den einzelnen Verlustkomponenten für durchlässige Flächen bei einem Blockregen .....	2-3
Abbildung 3-1:	Infiltrationsverlauf auf neu eingebauten und gealterten Pflasterflächen /Borgwardt, 1995-a/ .....	3-8
Abbildung 3-2 :	Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende nach 15-minütiger Infiltration /Borgwardt, 1995-a/ .....	3-9
Abbildung 3-3:	Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende nach 60-minütiger Infiltration /Borgwardt, 1995-a/ .....	3-11
Abbildung 3-4:	Versuchsergebnisse von Muth für verschieden Pflasterflächen: Zusammenhang zwischen Niederschlag, Versickerung und Oberflächenabfluss /Muth, 1994-a und 1994-b/ .....	3-13
Abbildung 3-5:	Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende für Normalpflaster nach Borgwardt und Muth .....	3-14
Abbildung 3-6:	Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende für sickerfähige Pflasterarten nach Borgwardt und Muth .....	3-15
Abbildung 3-7:	Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende für verschiedene Wegbeläge nach den Untersuchungen von Borgwardt und Muth .	3-22
Abbildung 4-1:	Modellbausteine und Prozesse im Schmutzfrachtmodell KOSMO .....	4-1
Abbildung 4-2:	Umverteilung der Niederschlagshöhe bei Ereignissen geringer Intensität nach erweitertem Horton-Ansatz /Verworn, 1993/ .....	4-5
Abbildung 5-1:	Schemadarstellung des Grobnetzes zur Simulation der Einheitsflächen .....	5-9
Abbildung 5-2:	Einzelmodellregen nach Euler-Typ 2 (Dauer 1 h, Regenhöhe 15 mm) .....	5-12
Abbildung 5-3:	Einzelmodellregen nach Euler-Typ 2 (Dauer 2 h, Regenhöhe 25 mm) .....	5-13
Abbildung 5-4:	Schemadarstellung des Entwässerungsnetzes von Einzugsgebiet 1 .....	5-27
Abbildung 5-5:	Schemadarstellung des Entwässerungsnetzes von Einzugsgebiet 2 .....	5-36
Abbildung 6-1:	Abhängigkeit der rechnerischen Abflussbeiwerte vom Versickerungsvermögen für Pflaster mit Fugen.....	6-5
Abbildung 6-2:	Abhängigkeit der rechnerischen Abflussbeiwerte von der Geländeneigung für Pflaster mit Fugen.....	6-7

## 1. Einleitung

### 1.1 Hintergrund und Problemstellung

Zur Bemessung und Bewertung entwässerungstechnischer Anlagen ist die Kenntnis des abflusswirksamen Niederschlages erforderlich. Bei herkömmlichen Berechnungsverfahren dienen Abflussbeiwerte zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Niederschlag und resultierendem Oberflächenabfluss. Je nach planerischer Zielsetzung werden verschiedene Abflussbeiwerte – mittlere Abflussbeiwerte, Endabflussbeiwerte oder Spitzenabflussbeiwerte - maßgebend. Die verschiedenen technischen Regelwerke geben hierzu Standardwerte für unterschiedliche Flächenarten vor. In jüngerer Vergangenheit finden auch vielfach computergestützte Abfluss- und Schmutzfrachtmodelle Anwendung in der Entwässerungsplanung, die den Niederschlagabfluss durch mathematische Nachbildung der Prozesse der Abflussbildung ermitteln. Hierbei werden Einzelverluste für Benetzung, Muldenauffüllung, Versickerung und Verdunstung durch entsprechende Modellparameter detailliert erfasst und berechnet.

Der Kenntnis des Niederschlagabflusses kommt in der Entwässerungsplanung eine große Bedeutung zu. Die Größe des abflusswirksamen Niederschlages bestimmt die Dimensionen entwässerungstechnischer Anlagen und beeinflusst somit in großem Maße deren Kosten. Nicht zuletzt aufgrund der Kostenentwicklung in der Siedlungsentwässerung, die durch einen teilweise überproportionalen Anstieg der einwohnerspezifischen Aufwendungen für die Sammlung und den Transport insbesondere des Regenwassers gekennzeichnet ist, werden heute hohe Anforderungen an die Planungsgenauigkeit gestellt.

Um finanziell ausgewogene Planungskonzepte realisieren zu können, sind daher vor allem eindeutige und möglichst exakte Bemessungsdaten erforderlich. Die aktuellen Normen und Regelwerke werden diesem Anspruch nur in begrenztem Umfang gerecht. Hiervon betroffen sind u.a. auch die einschlägigen Richtlinien der Kanalisationsdimensionierung (z.B. ATV-A 118, ATV- A 119, ATV-M 165, DIN EN 752), deren Angaben bezüglich der Abflussbeiwerte und der Modellparameter zur Abflusssimulation nicht ausreichend differenziert und nur bedingt aufeinander abgestimmt sind. Diese Problematik hat die ATV bewogen, ein Arbeitsblatt "Bemessungsgrundlagen für Abwasseranlagen" zu erarbeiten, mit dem Ziel, übergreifend über alle Regelblätter zur Kanal- und Kläranlagendimensionierung einheitliche Bemessungswerte festzulegen, die der geforderten Planungssicherheit Rechnung tragen. Im Zuge dessen ist u.a. die Kompatibilität der Ergebnisse von Niederschlag-Abfluss-Simulationen mit herkömmlichen Verfahren bezüglich des rechnerischen Oberflächenabflusses und den empfohlenen Abflussbeiwerte sicherzustellen.

## 1.2 Zielsetzung

Zielsetzung dieser Arbeit ist, anhand systematischer Modellberechnungen die Kompatibilität empfohlener Standardwerte mit den Berechnungsergebnissen von Abflussmodellen der Siedlungs- und Stadtentwässerung zu untersuchen. Hierzu sollen für typische Flächenarten die verschiedenen Abflussbeiwerte unter unterschiedlichen Niederschlagsbelastungen berechnet und den empfohlenen Standardwerten gegenübergestellt werden. Die verwandten Modellansätze und die Größen der Modellparameter sollen dokumentiert und diskutiert werden.

## 1.3 Vorgehensweise

Zunächst werden die im Rahmen dieser Untersuchung betrachteten Abflussbeiwerte in ihren Begriffsdefinitionen erläutert und hinsichtlich ihrer Anwendungsbereiche beschrieben.

In einem zweiten Arbeitsschritt erfolgt eine Auswertung der einschlägigen Literatur im Hinblick auf Abflussbeiwerte und Modellparameter zur Abflussbildung. Zum einen werden die in Deutschland gültigen technischen Richtlinien, die Abflussbeiwerte für verschiedene Flächenbefestigungen vorgeben, kurz vorgestellt. Des Weiteren wird ein Überblick über ausgewählte Untersuchungen zum Abflussverhalten durchlässig befestigter Flächen gegeben. Die Untersuchungsergebnisse werden ausgewertet und den Angaben in den Regelwerken gegenübergestellt.

In Kapitel 4 wird das eingesetzte Abfluss- und Schmutzfrachtmodell KOSMO vorgestellt und die verwandten Modellansätze zur Berechnung des Oberflächenabflusses erläutert.

Im anschließenden Hauptteil der Arbeit wird das Abflussverhalten gängiger Flächentypen anhand von Niederschlag-Abfluss-Simulationen untersucht. Unter Vorgabe in der Literatur empfohlener Modellparameter zur Abflussbildung wird für verschiedene Niederschlagsbelastungen der Oberflächenabfluss berechnet. Aus der Bilanzierung des Niederschlag-Abfluss-Verhaltens werden die einzelnen Abflussbeiwerte der unterschiedlichen Flächenarten ermittelt. In der ersten Untersuchungsphase werden Einheitsflächen mit einer Größe von jeweils 1000 m<sup>2</sup> betrachtet. In einem zweiten Untersuchungsschritt werden zwei fiktive Einzugsgebiete, ein ländlich bis kleinstädtisch strukturiertes Wohngebiet sowie ein städtisches Kerngebiet jeweils für verschiedene Befestigungsszenarien untersucht. In der Auswertung der Berechnungsergebnisse werden die ermittelten Abflussbeiwerte sowie die angesetzten Modellparameter den Standardwerten der einschlägigen Literatur gegenübergestellt und diskutiert.

Kapitel 6 umfasst Betrachtungen zur Genauigkeit der durchgeführten Abflusssimulationen. Es werden die Unsicherheiten der erzielten Untersuchungsergebnisse erläutert und eine Sensitivitätsanalyse ausgewählter Modellparameter durchgeführt.

---

Basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Arbeitsschritte werden die Untersuchungsergebnisse zusammengefasst und hinsichtlich der Frage der Kompatibilität der Ergebnisse der Abflusssimulation mit den empfohlenen Standardabflussbeiwerten diskutiert. Es wird erörtert, inwiefern mit der Abflusssimulation zutreffende Berechnungsergebnisse erzielt werden können und wo dahingehende Probleme bestehen. Abschließend werden ein Fazit der Gesamtuntersuchung gezogen und Empfehlungen zur Anwendungen von Abfluss- und Schmutzfrachtmodellen zur Berechnung des Oberflächenabflusses ausgesprochen.

## 2. Begriffsbestimmung "Abflussbeiwert"

Der Abflussbeiwert ist ein definierter Quotient aus den Größen Abfluss und Niederschlag. Bei der herkömmlichen Berechnung der Abflussbildung nach der Abflussbeiwertmethode wird der Bruttoniederschlag mit dem Abflussbeiwert multipliziert, um den Effektivniederschlag zu ermitteln. Der Abflussbeiwert gibt also an, welcher prozentuale Anteil des gefallenen Niederschlags zum Abfluss kommt /Zimmermann, 1999/. Hierbei sind verschiedene Abflussbeiwerte zu unterscheiden, die je nach Berechnungsziel Eingang in die Bemessungen finden. Man unterscheidet im wesentlichen zwischen dem mittleren Abflussbeiwert  $\psi_m$  und dem Spitzenabflussbeiwert  $\psi_s$ . Im Rahmen dieser Arbeit wird darüber hinaus noch der Endabflussbeiwert  $\psi_e$  betrachtet. Im folgenden werden die einzelnen Abflussbeiwerte erläutert und ihre Anwendungsmöglichkeiten kurz beschrieben.

### 2.1 Der Spitzenabflussbeiwert $\psi_s$

Der Spitzenabflussbeiwert  $\psi_s$  ist für die Berechnung von Maximalabflüssen zur Bemessung von Kanälen und Pumpwerksleistungen maßgebend. Er findet in erster Linie bei konventionellen Berechnungsverfahren (Fließzeitverfahren) Verwendung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Definition des Spitzenabflussbeiwertes nach ATV-Arbeitsblatt A 118 (1999) übernommen, das den Spitzenabflussbeiwert als Verhältnis der resultierenden maximalen Abflussspende und der zugehörigen Regenspende innerhalb eines Regenereignisses definiert /ATV, 1999/:

$$\psi_s = \frac{\text{max. Regenabflussspende}}{\text{zugehörigen Regenspende}} = \frac{q_{\max}}{r_{\max}}$$

Bei der zugehörigen Regenspende handelt es sich nach DIN 4045 "Abwasserwesen – Fachausdrücke und Begriffserklärungen" um die konstante Regenspende eines Blockregens /ATV, 1999/. Weitere Angaben zur Regenspende, beispielsweise zur zugrunde liegenden Zeitbasis o.ä., enthält das ATV-Arbeitsblatt A 118 nicht.

Einflussfaktoren auf die Größe des Abflussbeiwertes sind u.a. die Geländeneigung, die Art der Oberflächenbefestigung, die Beschaffenheit der Oberfläche, die Bodenart, die Vorbefeuchtung, die Temperatur, die Regendauer und die Regenstärke /Zimmermann, 1999/.

Das ATV-Arbeitsblatt A 118 empfiehlt für die Anwendung von Fließzeitverfahren Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit vom Anteil der befestigten Flächen, der Geländeneigungsgruppe und der maßgeblichen Bezugsregenspende  $r_{15}$ .

## 2.2 Der mittlere Abflussbeiwert $\psi_m$

Der mittlere Abflussbeiwert ist maßgebend für die Berechnung von Abfluss- und Speichervolumen und findet somit Anwendung in der Dimensionierung von Regenspeicherbecken und Pumpwerken /Hosang, Bischoff, 1988/.

Er beschreibt das mittlere Verhältnis des Abflussvolumens zum Niederschlagsvolumen über einen definierten Zeitraum /ATV, 2000/:

$$\psi_m = \frac{\text{Abflussvolumen}}{\text{Niederschlagsvolumen}} = \frac{\int_0^T Q(t) \cdot dt}{A \cdot r \cdot T}$$

Hierbei muss sich der betrachtete Zeitraum nicht auf ein Einzelereignis beschränken, sondern kann sich über einen längeren Zeitabschnitt erstrecken. So kann insbesondere ein Jahresmittelwert als Verhältnis zwischen Jahresabflussvolumen und Jahresniederschlagsvolumen angegeben werden.

## 2.3 Der Endabflussbeiwert $\psi_e$

Der Endabflussbeiwert wird u.a. herangezogen, um die Größe der undurchlässigen Fläche (z.B. bei der Berechnung nach ATV-Arbeitsblatt A 128) zu bestimmen. Die undurchlässige Fläche  $A_u$  ist der Anteil der befestigten Flächen, der nach Abdeckung der Benetzungs- und Muldenverluste abflusswirksam ist. Mit dem Endabflussbeiwert  $\psi_e$  ergibt sich  $A_u = \psi_e \cdot A_{\text{bef.}}$ . Des Weiteren findet der Endabflussbeiwert Eingang in Berechnung der Abflussbildung mittels Niederschlag-Abfluss-Modellen.

Bei der Berechnung der Abflussbildung wird die Differenz zwischen dem Bruttoniederschlag und dem abflusswirksamen Effektivniederschlag ermittelt. Die auftretenden Verluste setzen sich für undurchlässige Flächen im wesentlichen aus den Komponenten Benetzungsverlust, Muldenverlust und Dauerverlust zusammen. Bei durchlässigen Flächen kommt die Versickerung als weitere Verlustkomponente hinzu. Mit zunehmender Regendauer nimmt die Größe der Verluste ab und der Oberflächenabfluss bzw. der Abflussbeiwert steigt kontinuierlich bis zu einem Endwert an. Abbildung 2 zeigt diesen Sachverhalt qualitativ. Die Zusammenhänge der Abflussbildung werden in Kapitel 4 näher erläutert.



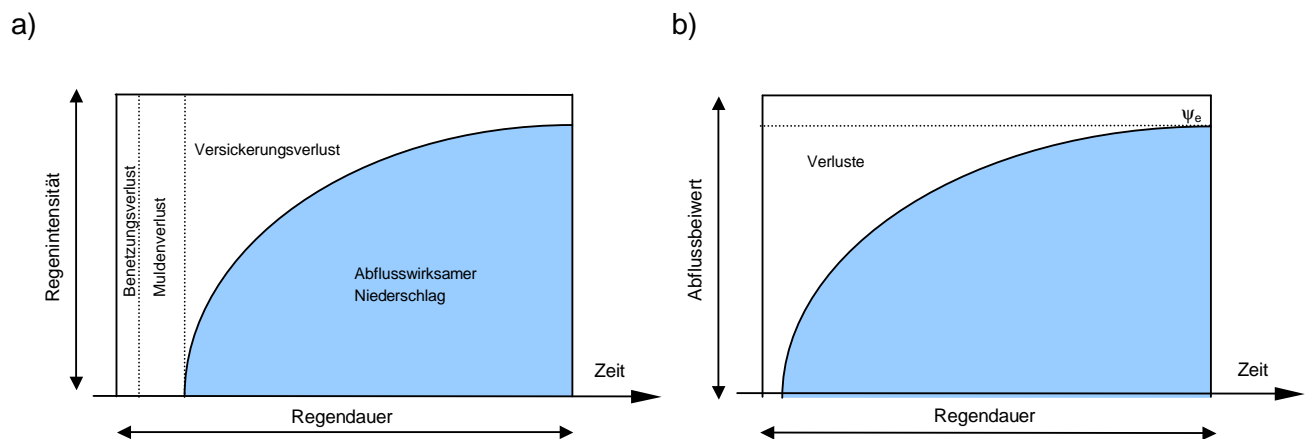


Abbildung 2-1: a) qualitativer Zusammenhang zwischen Regenintensität, Regendauer und den einzelnen Verlustkomponenten für durchlässige Flächen bei einem Blockregen  
 b) qualitativer Zusammenhang zwischen Abflussbeiwert, Regendauer und Verlusten für durchlässige Flächen bei einem Blockregen

Der Endabflussbeiwert gibt nun an, welcher prozentuale Anteil eines Bruttoniederschlags über einen definierten Zeitraum nach Abdeckung sämtlicher Benetzungs- und Muldenverluste zum Abfluss kommt. Entsprechend lässt sich folgende Definitionsgleichung aufstellen /Schmitt, 2000/:

$$\psi_e = 1 - \frac{h_{\text{Versickerung}}}{h_{\text{Niederschlag}}}$$

Durch die obige Definitionsgleichung soll mit dem Endabflussbeiwert  $\psi_e$  der abflusswirksame Beitrag durchlässig befestigter Flächen erfasst werden. Für undurchlässige Flächen ergibt sich entsprechend ein Endabflussbeiwert  $\psi_e = 1,0$ .

### **3. Abflussbeiwerte in der Literatur**

In der Literatur finden sich zahlreiche Angaben über das quantitative Abflussverhalten verschiedener Flächenbefestigungen. Zunächst sind die in Deutschland gültigen technischen Regeln zur Entwässerungsplanung zu nennen, die Abflussbeiwerte für verschiedene Flächenbefestigungen vorgeben. Darüber hinaus wurden in Deutschland in den letzten 15 Jahren zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, mit dem Ziel, das Versickerungsvermögen durchlässig befestigter Flächen zu bestimmen und den Regenwasserabfluss derartiger Flächen zu quantifizieren. Die Ergebnisse der Untersuchungen liefern für verschiedene Flächenbefestigungen u. a. Abflussbeiwerte (Spitzenabflussbeiwerte und Endabflussbeiwerte), aufnehmbare Regenspenden oder Durchlässigkeitsbeiwerte. Im Folgenden wird versucht, einen Überblick über die Ergebnisse ausgewählter Untersuchungen zu geben und diese den Angaben in Norm und Regelwerken gegenüber zu stellen.

#### **3.1 Normen und technische Regelwerke**

##### **3.1.1 DIN 1986 (1995) Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke**

Die Deutsche Norm „Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke“ DIN 1986 befasst sich in Teil 2 der Ausgabe März 1995 mit der Bemessung von Regenwasserleitungen /Deutsches Institut für Normung e. V. - DIN; 1995/. Danach ist für die Dimensionierung von Regenwasserleitungen innerhalb und außerhalb von Gebäuden eine maßgebliche Regenspende von mindestens 300 l/s-ha anzusetzen. Die Norm enthält u. a. Angaben über die Größe des Abflussbeiwertes unterschiedlicher Flächenarten. Hierbei handelt es sich, wenn dies auch nicht ausdrücklich genannt wird, um Spitzenabflussbeiwerte. Die für die jeweiligen Flächen anzusetzenden Werte sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

##### **3.1.2 DIN EN 752 (1996)**

Die Europäische Norm DIN EN 752 "Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden" regelt Planung, Bau, Betrieb und Unterhaltung von Entwässerungssystemen, die hauptsächlich als Freispiegelsysteme betrieben werden. Der Anwendungsbereich der Norm erstreckt sich von dem Punkt, wo das Abwasser das Gebäude bzw. die Dachentwässerung verlässt, bis zur Einleitung in eine Behandlungsanlage oder ein Gewässer /Deutsches Institut für Normung e. V. - DIN; 1996/. Teil 4 der Norm befasst sich mit der hydraulischen Berechnung der Entwässerungssysteme und empfiehlt die in Tabelle 3-2 aufgeführten Spitzenabflussbeiwerte. Im Gegensatz zur DIN 1986 sind die hier angegebenen Werte hinsichtlich der Art der Flächenbefestigung wenig differenziert.

Tabelle 3-1: Spitzenabflussbeiwerte  $\psi_s$  zur Ermittlung des Regenwasserabflusses nach DIN 1986/2 (1995) /Deutsches Institut für Normung e. V. - DIN; 1995/

Nr.	Art der Flächen	Abflussbeiwert $\psi_s$
1	Wasserundurchlässige Flächen, z. B. - Dachflächen > 3° Neigung - Betonflächen - Rampen - befestigte Flächen mit Fugendichtung - Schwarzdecken - Pflaster mit Fugenverguss - Dachflächen ≤ 3° Neigung - Kiesdächer - begrünte Dachflächen <sup>1)</sup> - für Intensivbegrünungen - für Extensivbegrünungen ab 10 cm Aufbaudicke - für Extensivbegrünungen unter 10 cm Aufbaudicke	1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 1,0 0,8 0,5 0,3 0,3 0,5
2	Teildurchlässige und schwach ableitende Flächen, z. B. - Betonsteinpflaster, in Sand oder Schlacke verlegt, Flächen mit Platten - Flächen mit Pflaster, mit Fugenanteil > 15 %, z. B. 10 cm x 10 cm und kleiner - wassergebundene Flächen - Kinderspielplätze mit Teilbefestigungen - Sportflächen mit Dränung - Kunststoff-Flächen, Kunststoffrasen - Tennenflächen - Rasenflächen	0,7 0,6 0,5 0,3 0,6 0,4 0,3
3	Wasserdurchlässige Flächen ohne oder mit unbedeutender Wasserableitung, z. B. - Parkanlagen und Vegetationsflächen, Schotter- und Schlackeboden, Rollkies auch mit befestigten Teilflächen, wie - Gartenwege mit wassergebundener Decke oder - Einfahrten und Einzelstellplätze mit Rasengittersteinen	0,0
<sup>1)</sup> Nach Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen		

Tabelle 3-2: Spitzenabflussbeiwerte nach DIN EN 752 (1996) /Deutsches Institut für Normung e. V. - DIN; 1995/

Art der angeschlossenen Fläche	Abflussbeiwert $\psi$	Anmerkungen
Undurchlässige Flächen und stark geneigte Dächer *)	0,9 bis 1,0	je nach Muldenverlust
Große Flachdächer	0,5	über 10 000 m <sup>2</sup>
Kleine Flachdächer	1,0	unter 100 m <sup>2</sup>
Durchlässige Flächen	0,0 bis 0,3	je nach Geländeneigung und Oberflächenbeschaffenheit

\*) Große vertikale Flächen (Fassaden) können bis zu 30 % berücksichtigt werden.

### 3.1.3 ATV-Arbeitsblatt A 118 (1999)

Das ATV-Arbeitsblatt A 118 (1999) befasst sich mit der Bemessung und dem Nachweis von Entwässerungssystemen, die vorwiegend als Freispiegelsysteme betrieben werden und zur Ableitung von Schmutz-, Regen- und Mischwasser dienen /ATV; 1999/.

Zur Bestimmung des Regenabflusses in der Kanalnetzberechnung nach dem Fließzeitverfahren ist die Größe der Spitzenabflussbeiwerte der entwässernden Flächen erforderlich. Das Arbeitsblatt A 118 empfiehlt hier Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit vom Anteil der befestigten Flächen, der Geländeneigungsgruppe und der maßgebenden Bezugsregenspende  $r_{15}$ , wie sie in nachstehender Tabelle 3-3 aufgeführt sind. Bei den angegebenen Werten wird der Abflussbeitrag der unbefestigten Teilflächen mit zunehmender Regenstärke berücksichtigt. Die Werte beziehen sich hierbei auf die Fläche des kanalisierten Einzugsgebietes  $A_{E,K}$ . Eine Differenzierung nach Art der Flächenbefestigung, wie sie in der DIN 1986/2 vorgenommen wird, erfolgt im ATV-Arbeitsblatt A 118 nicht.

Besonderen örtlichen Gegebenheiten bzgl. Dachflächenanteil und -art sowie Neigung der Entwässerungsflächen ist entsprechend Rechnung zu tragen. Die angeführten Spitzenabflussbeiwerte gelten nur für Fließlängen von 40-70 m. Sie liefern insbesondere bei nicht oder gering befestigten (Teil-)Einzugsgebieten mitunter unzutreffende Abflusswerte. Hier sind ergänzende Informationen bzgl. der lokalen Gegebenheiten einzubeziehen (Geologie, Grundwasserverhältnisse, Sättigungsverhalten des Bodens, etc.).

Tabelle 3-3: Empfohlene Spitzenabflussbeiwerte für unterschiedliche Regenspenden bei einer Regendauer von 15 Minuten ( $r_{15}$ ) in Abhängigkeit von der mittleren Geländeneigung  $I_G$  und dem Befestigungsgrad (für Fließzeitverfahren, aus ATV-A 118, 1997) /ATV; 1999/

Befestigungs- grad [%]	Gruppe 1				Gruppe 2				Gruppe 3				Gruppe 4			
	$I_G < 1 \%$				$1 \% \leq I_G \leq 4 \%$				$4 \% < I_G \leq 10 \%$				$I_G > 10 \%$			
	für $r_{15}$ [l/s-ha] von															
	100	130	180	225	100	130	180	225	100	130	180	225	100	130	180	225
0 <sup>)</sup>	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 <sup>)</sup>	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

<sup>)</sup> Befestigungsgrade  $\leq 10 \%$  bedürfen i.d.R. einer gesonderten Betrachtung

### 3.1.4 ATV-Merkblatt M 153 (2000)

Das Merkblatt enthält Empfehlungen zur mengen- und gütemäßigen Behandlung von Regenwasser in modifizierten Entwässerungssystemen oder in Trennsystemen /ATV, 2000/ und schließt mit seinem Erscheinen einen Großteil bislang bestehender Regelungslücken für die Versickerung und Einleitung von Niederschlagswasser in oberirdische Gewässer /Meißner, 2000/. Zur Berechnung des Niederschlagabflusses von befestigten Flächen für Fragestellungen im Rahmen des Merkblattes wird der mittlere Abflussbeiwert  $\psi_m$  herangezogen. Für eine differenzierte Flächenermittlung mit einer genaueren Bestimmung der undurchlässigen Flächen muss die Art der Befestigung aller Teilflächen bekannt sein. Die (fiktive) Größe aller undurchlässigen Teilflächen ergibt sich aus der Gleichung  $A_{u,i} = A_{E,i} \cdot \psi_{m,i}$ . Die maßgebende undurchlässige Gesamtfläche ergibt sich aus der Summe aller angeschlossenen Teilflächen. Das Merkblatt empfiehlt, für die verschiedenen Flächentypen die in Tabelle 3-4 aufgeführten mittleren Abflussbeiwerte anzusetzen.

Tabelle 3-4: Empfohlene mittlere Abflussbeiwerte  $\psi_m$  von Einzugsgebietsflächen für Berechnungen im Rahmen des Merkblattes M 153 /ATV; 2000/.

Flächentyp	Art der Befestigung	$\psi_m$
Schrägdach	Metall, Glas, Schiefer, Faserzement, Ziegel, Dachpappe	0,9 - 1,0 0,8 - 1,0
Flachdach (Neigung bis 3° oder ca. 5 %)	Metall, Glas, Faserzement Dachpappe Kies	0,9 - 1,0 0,9 0,7
Gründach (Neigung bis 15° oder ca. 25 %)	humusiert < 10 cm Aufbau humusiert $\geq$ 10 cm Aufbau	0,5 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 mit Regenabfluss in das Entwässerungssystem	toniger Boden	0,5
	lehmiger Sandboden	0,4
	Kies- und Sandboden	0,3
Gärten, Wiesen und Kulturland mit möglichem Regenabfluss in das Entwässerungssystem	flaches Gelände	0,0 - 0,1
	steiles Gelände	0,1 - 0,3

### 3.1.5 Veröffentlichung von Borgwardt zum Abflussbeiwert nach DIN 1986

Borgwardt macht in seiner Veröffentlichung kritische Anmerkungen zu den Spitzenabflussbeiwerten, die nach DIN 1986 Teil 2 von 1978 und den späteren Entwürfen von 1992 und 1994 für die jeweiligen Flächenarten anzusetzen sind /Borgwardt, 1994-b/. Seine Kritik gilt einerseits der Größe der anzusetzenden Abflussbeiwerte, aber auch der in der DIN vorgenommenen Einteilung der Flächenkategorien. In seinen Ausführungen bezieht er sich auf Forschungsergebnisse u.a. von Liesecke (1993 u. 1994), von Hade und Smith (1988), von Borgwardt (1993 und 1994), von Springborn (1993), von Kolb (1987) sowie von Hinderling und Kaufmann (1981). In Zusammenfassung der genannten Untersuchungen und bei einer Überprüfung der für die Grundstücksentwässerung entscheidenden Flächenkategorien macht Borgwardt den in nachstehender Tabelle 3-5 dargestellten Vorschlag. Er plädiert für eine Einteilung nach der grundsätzlichen Art der Befestigung in Dachflächen, Wegflächen und unbefestigte Flächen und nicht nach der Wasserdurchlässigkeit der Flächen. Die von Borgwardt vorgeschlagene Flächeneinteilung ist weitaus differenzierter als in der DIN 1986 und die Spitzenabflussbeiwerte liegen, vor allem bei den Wegflächen, höher.

Tabelle 3-5: Vorschlag von Borgwardt für die Spitzenabflussbeiwerte  $\psi_S$  /Borgwardt, 1994-b/

Nr.	Art der Flächen	Abflussbeiwert $\psi_S$
<b>1</b>	<b>Dachflächen</b>	
1.1	- unbegrünte Dachflächen	1,0
1.2	- bekieste Flachdächer	0,8
1.3	- extensiv begrünte Dächer bis 10 cm Aufbaudicke	0,5
1.4	- extensiv begrünte Dächer ab 10 cm Aufbaudicke	0,3
1.5	- intensiv begrünte Dächer	0,3
<b>2</b>	<b>Wegflächen</b>	
2.1	- Asphaltflächen	1,0
2.2	- Betonflächen	1,0
2.3	- Kunststoffflächen	1,0
2.4	- Pflasterflächen mit Fugenverguss	1,0
2.5	- Wegflächen in wassergebundener Bauweise	0,9
2.6	- Dränasphaltflächen	0,8
2.7	- Plattenflächen	0,8
2.8	- Pflasterflächen mit einem Fugenanteil bis 15 %	0,8
2.9	- wasserdurchlässiges Pflaster aus haufwerksporigem Beton	0,8
2.10	- wasserdurchlässiges Pflaster mit begrünten aufgeweiteten Fugen und Kammern	0,8
2.11	- Pflasterflächen mit einem Fugenanteil ab 15 %	0,6
2.12	- wasserdurchlässiges Pflaster mit splittverfüllten aufgeweiteten Fugen und Kammern	0,4
<b>3</b>	<b>Unbefestigte Flächen</b>	
3.1	- Rasen- und Gehölzflächen mit einer Neigung ab 10°	0,5
3.2	- Sportrasenflächen mit Dränung	0,3
3.3	- Rasen- und Gehölzflächen mit einer Neigung bis 10°	0,0

Die von Borgwardt geäußerten Anmerkungen beziehen sich auf die DIN 1986 in der Ausgabe von 1978 und auf die späteren Entwürfe von 1992 und 1994. Es sei angemerkt, dass die Neuausgabe der DIN 1986 Teil 2 seit 1995 erschienen ist. Die angegebenen Spitzenabflussbeiwerte haben sich hierbei gegenüber dem Entwurf von 1994 nicht mehr verändert, so dass die Einwände von Borgwardt unmittelbar auf die derzeit gültige Fassung der DIN 1986/2 übertragbar sind.

## 3.2 Untersuchungen von Pflasterflächen

### 3.2.1 Untersuchung von Borgwardt zur Versickerung auf Pflasterflächen

Umfangreiche Untersuchungen über die Durchlässigkeit von Flächenbefestigungen wurden von Borgwardt vom Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur der Universität Hannover im Rahmen eines Forschungsvorhabens durchgeführt /Borgwardt, 1995-a/. Im Mittelpunkt seiner Arbeit steht die Untersuchung des Versickerungsvermögens von Pflasterflächen in Abhängigkeit von Alter, Verkehrsbelastung und Fugenanteil. Borgwardt führte 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 wasserdurchlässiger Pflasterbeläge gewinnen.

Um die Versickerungsfähigkeit in situ an ungestörten Standorten zu untersuchen, verwendete Borgwardt ein an der TH Darmstadt entwickeltes Tropfinfiltrimeter, mit dem eine künstliche Beregnung der Untersuchungsfläche erfolgen kann. Die Intensität der Beregnung wird 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.

Die Untersuchung von Borgwardt zeigt den zeitlichen Verlauf der aufnehmbare Regenspende, d.h. die Regenspende, die die jeweilige Flächenbefestigung ohne Entstehung eines Oberflächenabflusses aufzunehmen vermag. Die ermittelten Ganglinien der Infiltration werden als Regressionskurven der gemittelten Infiltrationswerte dargestellt und zeigen in ihrem charakteristischen Verlauf einen hohen Anfangswert, der mit zunehmender Sättigung nach 10 bis 30 Minuten abfällt und sich schließlich asymptotisch einem konstanten Endwert nähert. Der Infiltrationsverlauf auf neu eingebauten und auf gealterten Pflasterflächen ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

Eine vollständige Sättigung des Untergrundes ist erreicht, wenn die Infiltrationsrate nicht weiter abnimmt. Dieser Zustand stellt sich i.d.R. nach ein- bis zweistündiger Beregnung ein /Bischoff, 1988/. Demgemäß definiert Borgwardt in seiner Untersuchung den Wert der Infiltrationsrate  $i_{(60)}$  nach 60-minütiger Beregnung als Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$ . In Anlehnung an die herkömmliche Berechnung des Regenwasserabflusses nach dem Zeitbeiwertverfahren, der i.d.R. eine Bemessungsregenspende mit einer Dauer von 15 Minuten zugrunde gelegt wird, interpretiert Borgwardt den Wert der Infiltrationsrate  $i_{(15)}$  nach 15-minütiger Beregnung als potentiell aufnehmbare Regenspende.

Die Untersuchung des Infiltrationsverlaufes zeigt, dass vor allem in den ersten zehn bis fünfzehn Minuten eines Regens sehr hohe Intensitäten über eine Pflasterfläche zurückgehalten werden können. In der Regel sind hier bis zu 75 l/(s·ha) aufnehmbar, die bis 90 % der Jahresniederschlagsmenge ausmachen. Insbesondere aber bezogen auf einzelne Ereignis-



se mit höheren Intensitäten kommt es zu einem oberflächigen Abfluss, der über Entwässerungsanlagen beseitigt werden muss.

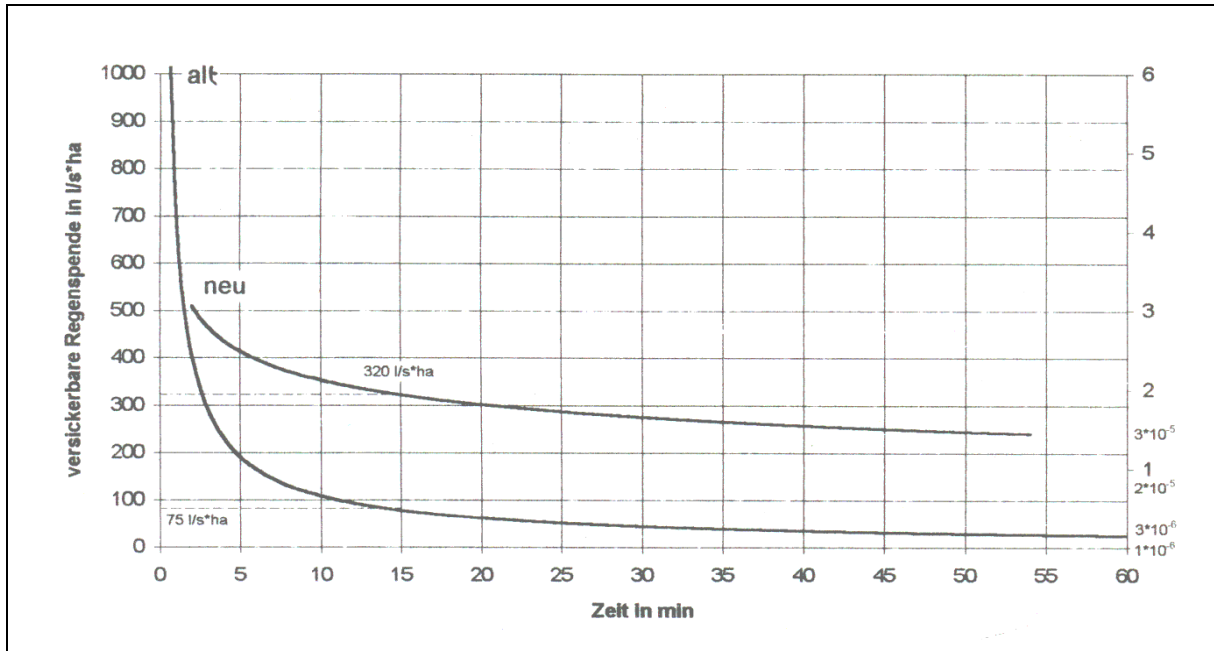


Abbildung 3-1: Infiltrationsverlauf auf neu eingebauten und gealterten Pflasterflächen /Borgwardt, 1995-a/

Darüber hinaus machen die Untersuchungen von Borgwardt deutlich, dass die aufnehmbare Regenspende eine vom Aufbau der Flächenbefestigung und deren Versickerungseigenschaften abhängige Größe ist, die sich mit der Dauer der Beregnung ändert. Bei andauernder Versickerung nimmt die Bodenfeuchte und somit der Sättigungsgrad des Bodenkörpers zu, bis der Boden schließlich gesättigt ist. Die versickerbare Wassermenge nimmt entsprechend fortschreitend ab, bis sie bei vollständiger Sättigung ihren Endwert erreicht. Übersteigt die aufgebrachte Regenspende die momentan aufnehmbare Regenspende, so fließt der nicht aufnehmbare Anteil oberflächlich ab.

Anhand der Untersuchung von Verkehrsflächen verschiedenen Alters stellte Borgwardt deutliche Unterschiede im Versickerungsverhalten von neu eingebauten gegenüber gealterten Pflasterflächen fest (siehe Abbildung 3-1). In weiteren Untersuchungen 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. Es wurde festgestellt, dass sich die Stoffeigenschaften des eingebauten Mineralstoffes in den Fugen im Laufe der Standzeit erheblich verändern. Hierbei ist insbesondere ein hochsignifikanter Anstieg der mineralischen und organischen Feinteile zu nennen, der eine Verringerung der Wasserdurchlässigkeit um eine Zehnerpotenz zur Folge hat. Die Ermitt-

lung des zeitlichen Verlaufes der Zunahme der Feinteile ergab, dass bereits nach einem Standjahr mit einer erheblichen Verringerung der Versickerungsfähigkeit der Pflasterfugen zu rechnen ist. Inwiefern die DIN 1986/2 und die ATV-Richtlinien diesem Sachverhalt Rechnung tragen, ist den Regelwerken nicht zu entnehmen.

Des Weiteren konnte Borgwardt feststellen, dass ein Ansteigen der Infiltrationsrate mit dem Fugenanteil nur bei neu eingebauten Flächen zu verzeichnen ist. Bei gealterten Flächen ist das Versickerungsvermögen vom Anteil der Grobporen des Mineralstoffgemisches abhängig. So werden bei ausreichendem Anteil an Grobporen eingetragene Feinteile über die Fuge in den Oberbau der Pflasterfläche transportiert, so dass kein wesentlicher Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit zu erwarten ist. Umgekehrt verhält es sich bei gealterten Pflasterflächen mit hohem Feinkornanteil, bei denen sich ein hoher Fugenanteil negativ auf das Infiltrationsvermögen auswirken kann.

Aus den Ergebnissen der Infiltrationsmessungen leitet Borgwardt die in Abbildung 3-2 dargestellten Spitzenabflussbeiwerte ab. Hierbei definiert er den Spitzenabflussbeiwert als Verhältnis zwischen der versickerbaren Regenspende  $i_{(15)}$  nach 15-minütiger Beregnung zu einer bestimmten (fiktiven) Regenspende.

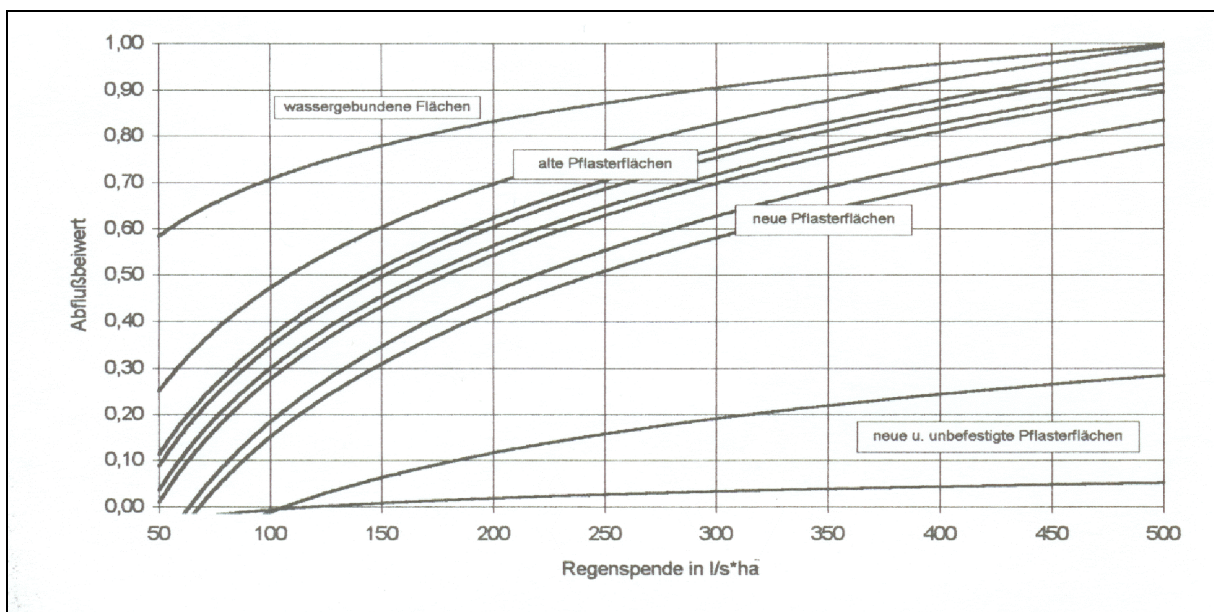


Abbildung 3-2 : Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende nach 15-minütiger Infiltration /Borgwardt, 1995-a/

Für eine Regenspende von 300 l/(s\*ha), die entsprechend DIN 1986/2 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, kann dauerhaft ein Abflussbeiwert von 0,4-0,6 erzielt werden. Dagegen ist bei begrünten Pflasterbelägen aufgrund des erhöhten Anteils an organischen und mineralischen Feinteilen sowie bei was-

sergebundenen Bauweisen aufgrund der dichten Lagerung von einem Abflussbeiwert von 0,9 auszugehen. Hierbei wird deutlich, dass insbesondere wassergebundene Decken nicht das Versickerungsvermögen besitzen, das ihnen zugesprochen wird. Der in der DIN 1986/2 ausgewiesene Spitzenabflussbeiwert von 0,5 für wassergebundene Flächen kann durch die Untersuchungen von Borgwardt in keinster Weise gestützt werden. Es zeigt sich vielmehr, dass sich wassergebundene Befestigungen aufgrund der Belastung des Mineralkörpers in der Verschleißschicht und der einhergehenden Nachverdichtung weitaus weniger durchlässig darstellen als Pflasterbauweisen /Borgwardt, 1994-a und 1995-b/.

Analog den Spitzenabflussbeiwerten weist Borgwardt die in Abbildung 3-3 aufgeführten End- oder Dauerabflussbeiwerte als Verhältnis zwischen der versickerbaren Regenspende in wassergesättigtem Zustand  $i_{(60)}$  nach 60-minütiger Beregnung zu einer bestimmten Regenspende aus. Im Vergleich mit den Spitzenabflussbeiwerten nach 15-minütiger Infiltration fallen die Endabflussbeiwerte höher aus. Die höheren Werte gegenüber der 15-minütigen Beregnung sind nach Borgwardt in Relation zu dem niedrigeren Abflussvolumen zu sehen. Diese Erläuterung ist zwar zutreffend aber allein nicht ausreichend. Tatsache ist, dass eine Regenspende bei einer Dauer von 60 Minuten sehr viel seltener auftritt als eine Regenspende gleicher Höhe mit einer Dauer von 15 Minuten. Dies sei an einem einfachen Beispiel verdeutlicht. Gegenüber einer Blockregenspende  $r_{T=15, n=0,1} = 270 \text{ l/s}\cdot\text{ha}$  von 15 Minuten Dauer ergibt sich für die gleiche statistische Häufigkeit nach Reinhold lediglich eine Regenspende  $r_{T=60, n=0,1} \approx 90 \text{ l/s}\cdot\text{ha}$  bei einer Dauer von 60 Minuten. Um die Spitzen- und Dauerabflussbeiwerte miteinander vergleichen zu können, müssen Regenereignisse gleicher Häufigkeiten betrachtet werden. Berücksichtigt man dies, bewegen sich die Abflussbeiwerte etwa in gleichen Größenordnungen. Zudem erscheint der von Borgwardt in Abbildung 3-3 angegebene Bereich von Regenspenden nicht sinnvoll. Geht man von einer Bezugsregenspende  $r_{T=15, n=1} = 120 \text{ l/s}\cdot\text{ha}$  aus, entspricht eine Blockregenspende  $r_{T=60} = 200 \text{ l/s}\cdot\text{ha}$  einer Häufigkeit von  $n = 0,008$ , also einem Niederschlagsereignis, wie es statistisch nur alle 125 Jahren auftritt. Für derartig geringe Häufigkeiten werden Entwässerungsanlagen aber keinesfalls ausgelegt, so dass die Angabe derart großer Regenspenden unsinnig ist. Bei einer betrachteten Niederschlagsdauer von 60 Minuten sind selten größere Regenspenden als  $100 \text{ l/s}\cdot\text{ha}$  anzusetzen (entspricht etwa einer Häufigkeit  $n = 0,1$ ).

Es sei angemerkt, dass die Abhängigkeit des Spitzenabflussbeiwertes von der Regenspende, wie sie von Borgwardt in Abbildung 3-2 dargestellt wird, sich nur rechentechnisch entsprechend der Definition ergibt, indem er die aufnehmbare Regenspende  $i_{(15)}$  zu einer bestimmten (fiktiven) Regenspende ins Verhältnis setzt. Analog gilt dies für die Endabflussbeiwerte. Eine hydrologische und bodenphysikalische Abhängigkeit der aufnehmbaren Regenspende einer Flächenbefestigung von der aufgebrachten Regenspende ist nach den Untersuchungen von Borgwardt nicht gegeben. Die maximale Infiltrationsrate ist allein von Art und Aufbau der Befestigung abhängig.

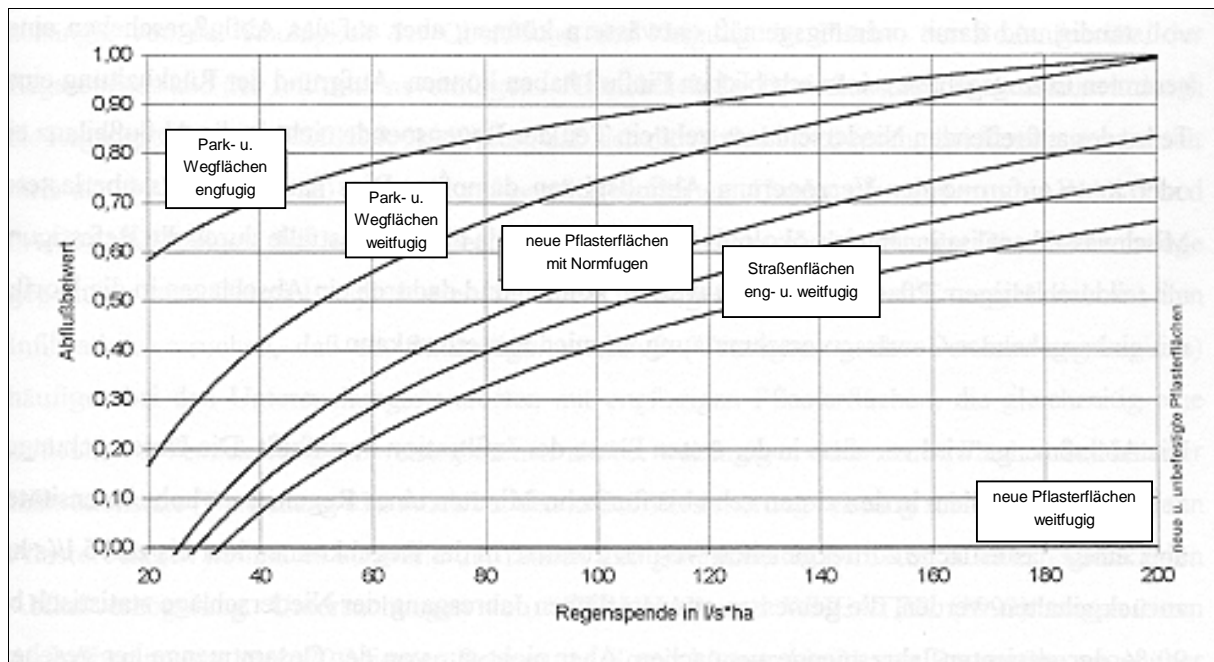


Abbildung 3-3: Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende nach 60-minütiger Infiltration /Borgwardt, 1995-a/

Die Untersuchungen von Borgwardt sind die umfangreichsten ihrer Art, die in Deutschland bislang durchgeführt wurden. Durch die Untersuchung sowohl an neu verlegten als auch an über Jahren genutzten Verkehrsflächen in situ, konnten wertvolle praxis- und anwendungsbezogene Ergebnisse erzielt werden. Borgwardt konnte zeigen, dass zu Regenbeginn das Infiltrationsvermögen sehr hoch ist und mit zunehmender Sättigung einem konstanten Endwert zustrebt. Des Weiteren wurde deutlich, dass das Versickerungsvermögen von Pflasterflächen im Laufe weniger Standjahre durch den Eintrag von Feinteilen um eine Zehnerpotenz abnimmt. Aus den Ergebnissen der Infiltrationsmessungen leitete Borgwardt sowohl Spitzen- als auch Endabflussbeiwerte ab.

### 3.2.2 Untersuchungen von Muth zur Versickerung auf Betonsteinpflaster

Mit der Regenwasserversickerung von befestigten Flächen beschäftigt sich auch Muth eingehend, der an der Versuchsanstalt für Wasserbau der FH Karlsruhe zahlreiche Untersuchungen über das Versickerungsverhalten von teildurchlässigen Flächenbelägen angestellt hat. Die Untersuchungen wurden im Auftrag von Herstellern verschiedener Befestigungssysteme aus Betonsteinpflaster durchgeführt. Neben allgemeinen Hinweisen zu Aufbau, Einsatzmöglichkeiten und Entwässerungsverhalten von sickerfähigen Flächenbefestigungen gibt Muth in seinen Veröffentlichungen Auskunft über das in Versuchen festgestellte Sickerverhalten verschiedener Pflasterarten /Muth, 1994-a und 1994-b/.

Die Versuche wurden in einem Modell mit 2,0 m<sup>2</sup> gefällelos verlegter Fläche durchgeführt. Der Niederschlag wurde ausschließlich künstlich über eine Regenanlage aufgebracht. Untersucht wurden Oberflächenabfluss, Versickerung und Rückhalt in Abhängigkeit von der Regenspende. Aufgebracht wurden Niederschläge zwischen 100 l/s-ha und 1000 l/s-ha. Die Verdunstung während der kurzzeitigen Niederschlagsereignisse wurde vernachlässigt. Hinsichtlich des Aufbaus und der Untersuchungsmethode unterscheiden sich die Versuche von Muth gegenüber den Messungen von Borgwardt, der zum einen die Intensität der Beregnung dem momentanen Infiltrationsvermögen Fläche entsprechend steuert und zum anderen seine Messungen an alten und neu verlegten Flächen in situ durchführt.

Die Versuche an Pflaster mit Sickeröffnungen zeigen, dass, bei gleichem Aufbau der Bettung und gleicher Verfüllung der Öffnungen, die Sickerfähigkeit vom prozentualen Anteil der Sickerfläche und von deren Verteilung über die Fläche abhängt. Diesbezüglich kommt Muth zu einem ähnlichen Ergebnis wie Borgwardt, der eine Zunahme der Infiltrationsrate mit steigendem Fugenanteil bei neu verlegten, nicht aber bei älteren Flächen, festgestellt hat. Die aufnehmbaren Regenspenden der einzelnen Pflasterarten, bei denen gerade noch kein Oberflächenabfluss auftritt, sind in Tabelle 3-6 dargestellt. Muth verzeichnete aufnehmbare Regenspenden zwischen 200 l/s-ha und 800 l/s-ha. Bei vergleichenden Untersuchungen an Normalpflaster ohne Sickeröffnungen kommt es ab einer Regenspende von etwa 80 l/s-ha zu einem Oberflächenabfluss, was nach Muth einem Abflussbeiwert von ca. 0,4 entspricht, einem Wert, der in dieser Größenordnung auch in der DIN 1986 angegeben wird.

Tabelle 3-6: Aufnehmbare Regenspenden verschiedener Pflasterflächen nach Muth

Art der Pflasterung	Aufnehmbare Regenspende in l/s-ha
<b>Haufwerksporiges Pflaster</b>	
- mit 11 % Porenvolumen	40
- mit 18 % Porenvolumen	300
- mit 20 % Porenvolumen	750
- mit 22 % Porenvolumen	300
<b>Pflaster mit Sickeröffnungen</b>	
- mit 9 % Flächenanteil der Sickeröffnung	350
- mit 10 % Flächenanteil der Sickeröffnung	200
- Rasenkammerstein mit 30 % der Fläche als Sickeröffnung	750
<b>Normalpflaster</b>	
- Normalpflaster mit 3 % Fugenanteil	80

Den gemessenen Zusammenhang zwischen Niederschlag, Versickerung und Oberflächenabfluss für die untersuchten Pflasterflächen zeigt Abbildung 3-4. Bei den Versuchen mit haufwerksporigem Pflaster aus Mineralbeton wurden Versickerungsleistungen zwischen 150 l/s-ha und über 500 l/s-ha gemessen. Hierbei war nach Muth eine proportionale Zunahme der Sickerspende mit Zunahme der Porosität zu verzeichnen, die allerdings mit einer Abnahme der Druckfestigkeit einhergeht. Dieser Sachverhalt geht allerdings aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen nur bedingt hervor. Der untersuchte Pflasterstein mit 22 Prozent Porenvolumen weist ein deutlich schlechteres Versickerungsvermögen als

der untersuchte Stein mit einem Porenvolumen von nur 18 Prozent. Darüber hinaus fällt auf, dass das Versickerungsverhalten für unterschiedliche haufwerksporige Pflastersteine deutliche Unterschiede aufweist.

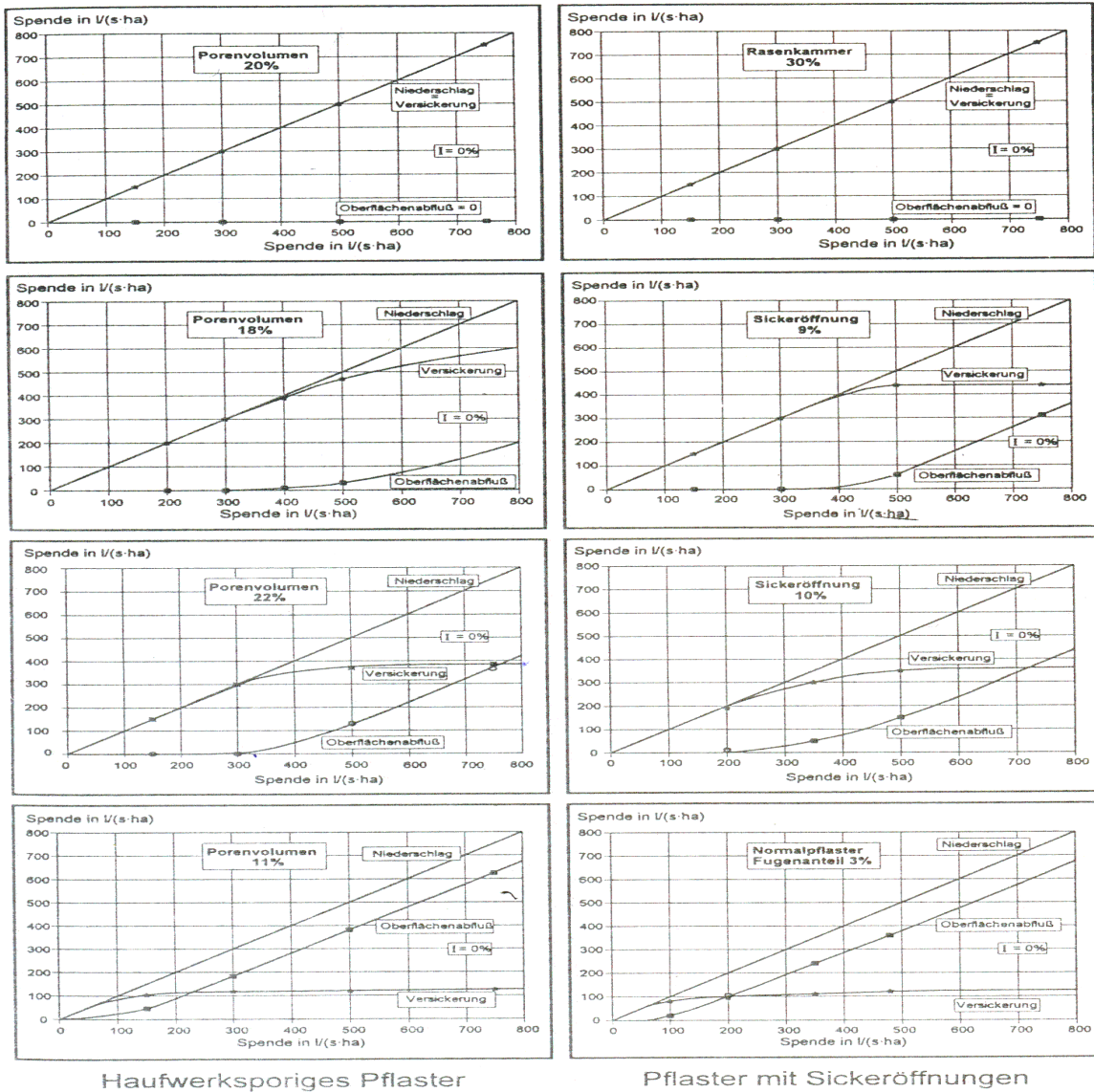


Abbildung 3-4: Versuchsergebnisse von Muth für verschieden Pflasterflächen: Zusammenhang zwischen Niederschlag, Versickerung und Oberflächenabfluß /Muth, 1994-a und 1994-b/.

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse, insbesondere zu den Ergebnissen von Borgwardt, zu erzielen, werden aus den graphischen Darstellungen des Abflussverhaltens der einzelnen Pflasterflächen in Abbildung 3-4 Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende abgeleitet. Diese Abflussbeiwerte sind in nachstehender Tabelle 3-7 aufgeführt und dürfen nur als tendenzielle Vergleichswerte gelten, die nicht zu verallgemeinern sind.

Tabelle 3-7: Aus den Ergebnissen von Muth abgeleitete Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende

Art der Flächenbefestigung	Spitzenabflussbeiwerte für Regenspende [l/s ha] von				
	100	200	300	400	500
Normalpflaster (Fugenanteil 3%)	0,20	0,50	0,65	0,73	0,76
Pflaster mit Sickeröffnung (9 %)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,12
Pflaster mit Sickeröffnung (10 %)	0,00	0,00	0,10	0,20	0,30
Rasenkammerstein	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haufwerksporiges Pflaster					
- mit 11 % Porenvolumen	0,25	0,45	0,62	0,71	0,77
- mit 22 % Porenvolumen	0,00	0,00	0,00	0,13	0,25
- mit 18 % Porenvolumen	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06
- mit 20 % Porenvolumen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6 zeigen die Darstellungen der Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende aus den beiden Untersuchungen von Muth und Borgwardt für Normalpflaster und für sickerfähiges Pflaster.

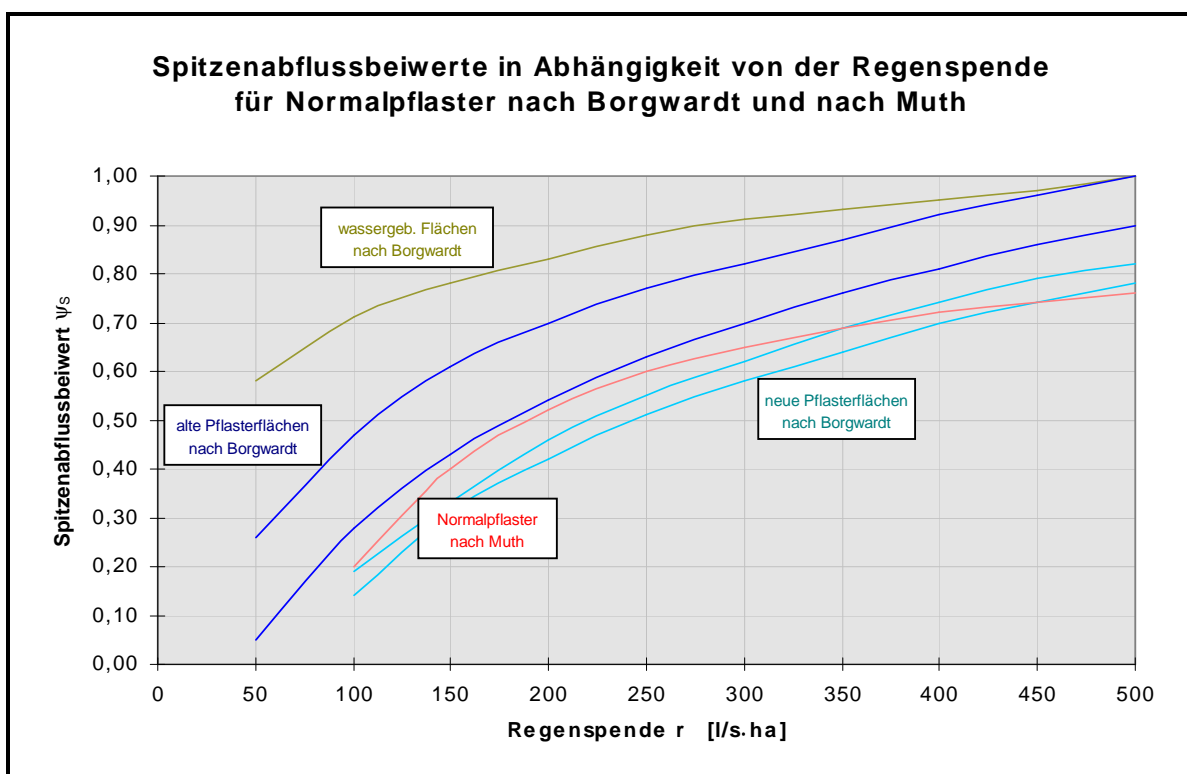


Abbildung 3-5: Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende für Normalpflaster nach Borgwardt und Muth

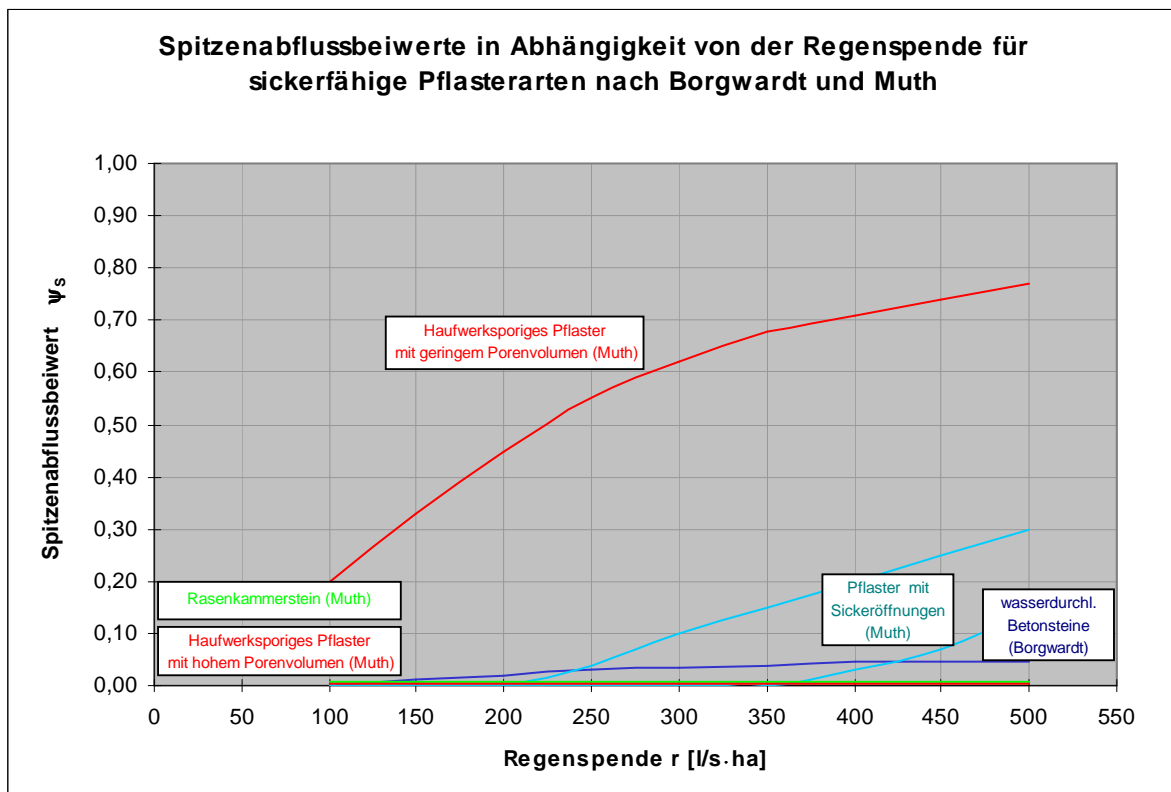


Abbildung 3-6: Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende für sickerfähige Pflasterarten nach Borgwardt und Muth

Die aus den Ergebnissen von Muth abgeleiteten Spitzenabflussbeiwerte bestätigen der Größenordnung nach die Ergebnisse von Borgwardt für die vergleichbaren Pflasterflächen. Für Normalpflaster liegen die Werte von Muth zwischen den Bereichen für neue und alte Normalpflasterflächen nach Borgwardt. Bei den sickerfähigen Pflasterarten unterscheidet Muth zwischen haufwerksporigem Pflastersteinen und Pflasterflächen mit Sickeröffnungen, während Borgwardt diese beiden Pflasterarten in einer Kategorie zusammenfasst. Die Spitzenabflussbeiwerte für haufwerksporiges Pflaster nach Muth, schwanken je nach Porenvolumen in einem weiten Bereich. Bei einem relativ geringen Porenvolumen (hier: 11 %) stellt sich kein nennenswerter Unterschied in der Versickerungsleistung gegenüber herkömmlichem Pflaster ein, während bei einem hohen Porenanteil kein Oberflächenabfluss zu verzeichnen ist. Die Abflussbeiwerte nach Borgwardt weisen für Sickerpflaster geringere Werte auf und bewegen sich im Bereich der Pflastersysteme mit großen Versickerungsleistungen nach Muth.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Untersuchungen von Muth an neu verlegten Pflasterflächen in Modellversuchen durchgeführt wurden und keinerlei Aufschluss über das Versickerungsverhalten nach mehrjähriger Nutzung derartiger Flächen in situ geben. Borgwardt hat gezeigt, dass das Versickerungsvermögen innerhalb weniger Standjahre um eine Zehnerpotenz abnimmt (vgl. 2.2.1). Darüber hinaus bezieht sich Muth auf ausgewählte Pflastersysteme (z. B. EXECK-ÖKO, EXECK-KLIMAPOR), die ein bestimmtes Porenvolumen sowie einen bestimmten Anteil und eine bestimmte Verteilung der Sickeröffnungen aufweisen. Es erscheint daher fraglich, ob die Ergebnisse der Untersuchung verallgemeinert



und auf ähnliche Pflasterflächen übertragen werden können. In den Versuchen zeigte sich, dass die Angabe eines bestimmten Flächenanteils der Sickeröffnungen allein keinen unmittelbaren Aufschluss über das Versickerungsverhalten der Pflasterfläche liefert. Die Untersuchungsfläche mit 9 % Sickerflächenanteil weist ein deutlich höheres Versickerungsvermögen auf als die Fläche mit 10 % Anteil an Sickeröffnungen. Ähnlich stellt es sich bei den haufwerksporigen Pflastersteinen dar, bei denen ein größeres Porenvolumen nicht zwangsläufig zu einer größeren Infiltrationsfähigkeit führt (vgl. Tabelle 3-6).

### **3.2.3 Untersuchung von Hanses et al. zum Verhalten von wasserdurchlässigem Pflaster auf gering durchlässigem Untergrund**

Die Auswirkungen der Durchlässigkeit des Oberbaus bei wenig durchlässigem Untergrund auf die Tragfähigkeit einer Straßenkonstruktion und den Wasserhaushalt des Oberbaus waren Gegenstand eines zweijährigen Forschungs- und Entwicklungsprojektes /Hanses et al., 1999/. Hintergrund der Untersuchungen waren die von der Fachwelt geforderten Einsatzbeschränkungen für wasserdurchlässige Befestigungen. Neben einer Beschränkung der Verkehrsbelastung entsprechend den Bauklassen V und VI, einem ausreichenden Flurabstand zum Grundwasserspiegel und den Anforderungen an den Verschmutzungsgrad des versickerten Wassers stellt insbesondere die Forderung nach einem Durchlässigkeitsbeiwert des Untergrundes von  $k_f \geq 5,4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  (entspricht 540 l/s·ha) eine derart große Hürde dar, dass durchlässige Beläge im überwiegenden Teil Deutschlands nicht verwendet werden dürften. In einem Großversuch an einer ausreichend großen Testfläche sollte nun untersucht werden, ob sich ein durchlässiger Pflasterbelag auf gering durchlässigem Untergrund hinsichtlich der Tragfähigkeit und des Verbleibs des infiltrierten Oberflächenwassers trotzdem bewährt. Hierbei wurde im wesentlichen die Retentionswirkung der Trag- und Frostschutzschicht sowie die Veränderung der Tragfähigkeit infolge des Wasserzutritts untersucht. Zur Ermittlung der Retentionswirkung wurden für zwei unterschiedliche Schichtkonstruktionen künstliche Beregnungen (15-minütiger Regen mit  $r = 200 \text{ l/s·ha}$ ) durchgeführt und der Oberflächen- und Drainageabfluss gemessen. Darüber hinaus wurden Langzeitbeobachtungen über den Oberflächenabfluss durchgeführt.

Aus den Versuchsergebnissen kann abgeleitet werden, dass durch Anwendung eines durchlässigen Pflasterbelages alle Niederschlagsereignisse, die unter der Infiltrationsfähigkeit des Pflasters liegen, keine Oberflächenabflüsse erzeugen. Während des zweijährigen Beobachtungszeitraumes war an der Testfläche weder durch natürliche noch durch künstliche Beregnung ein Oberflächenabfluss festzustellen. Der eingesetzte Pflasterstein hatte hierbei keinen Einfluss auf die Untersuchung und deren Ergebnisse, solange sein Infiltrationsvermögen größer als der aufgebrauchte Niederschlag ist (hier: 200 l/s·ha). Es zeigt sich, 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

gestreckt, d. h. es kommt zu einer zeitlichen Verzögerung und zu einer Reduzierung der Abflussamplitude. 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.

Es sei angemerkt, dass die von Hanses et al. getroffene Abschätzung des Abflussbeiwertes wasserdurchlässiger Pflasterbeläge im Hinblick auf die Untersuchungen von Borgwardt (s. o.) sehr optimistisch erscheint. 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 wasserdurchlässige Flächenbefestigungen auswirkt, wie allgemein angenommen wird, so dass die Forderung einer Durchlässigkeit des Untergrundes bzw. des Unterbaus von  $k_f \geq 5,4 \cdot 10^{-5}$  m/s nicht gerechtfertigt erscheint. Hier existiert sicherlich noch ein erheblicher Untersuchungsbedarf.

### **3.3 Untersuchung von Dachbegrünungen**

#### **3.3.1 Untersuchung von Liesecke zum Retentionsvermögen von Dachbegrünungen**

In den Jahren 1985 bis 1994 wurde am Standort Hannover-Herrenhausen in zahlreichen Freilandversuchen das Wasserrückhaltevermögen von extensiven Dachbegrünungen an insgesamt 46 Bauweisen untersucht /Liesecke; 1998/.

Aus diesen Langzeituntersuchungen geht hervor, dass das Ausmaß der Wasserrückhaltung weniger von der Art der Bauweise und der Art der Funktionsschichten als vielmehr von der Aufbaudicke abhängt, wobei allerdings stoffliche Besonderheiten zu berücksichtigen sind. Unterschiede zwischen den Aufbaudicken treten bei sommerlicher Witterung deutlich hervor. Bei kühlerer Witterung werden sie zunehmend ausgeglichener, um bei winterlicher Witterung nahezu gleich hoch auszufallen. Obgleich in der Sommerperiode der höhere Anteil des Jahresniederschlages fällt, ist hier die Wasserrückhaltung am größten, während in der Winterperiode aufgrund der geringeren Evaporation und Transpiration der Wasserabfluss am höchsten ist. Darüber hinaus zeigen die Versuche, dass das Leistungsvermögen dünnschichtiger extensiver Dachbegrünungen mit Aufbaudicken von nur 2 bis 6 cm unerwartet groß ist. Derartige Bauweisen kommen bei wenig belastbaren Dachflächen insbesondere bei Gewerbe- und Industriebauten zur Ausführung und nehmen einen hohen Flächenanteil ein. Die Höhe der erreichten Wasserrückhaltung wird hierbei weniger durch die Dicke und die stoffliche Zusammensetzung des Schichtaufbaues als vielmehr durch die entstandenen Vegetationsformen bewirkt. Wesentlich ist der hohe Deckungsanteil an Moosen, die ähnlich einem Schwamm mehr als 90 Vol.-% Wasser aufzunehmen vermögen.

Des Weiteren wurden Beregnungsversuche an den Untersuchungsflächen durchgeführt und hinsichtlich des Rückhaltevermögens ausgewertet. Hierbei wurden drei Niederschlagsereignisse mit Regenmengen von 27 mm/min und 15-minütiger Dauer (entspricht  $r_{15} = 300 \text{ l/s}\cdot\text{ha}$ ) im Abstand von zwei Stunden simuliert und das Ergebnis aus der zweiten und dritten Messung ermittelt. Es wurde also der ungünstigste Fall nach einem vorlaufenden Niederschlag und der annähernden Einstellung des Wassergehaltes bei maximaler Wasserkapazität herangezogen. Entsprechend konnten aus den Ergebnissen die in Tabelle 3-8 dargestellten Spitzenabflussbeiwerte abgeleitet werden. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Abflussverzögerung bei Dachbegrünungen dazu führt, dass die höchsten Abflussspenden und damit die höchsten Abflussbeiwerte erst nach Ende des Niederschlagsereignisses auftreten, also zu einem Zeitpunkt, da die Niederschlagsabflüsse von schnell entwässernden, befestigten Flächen bereits abgelaufen sind. Mehrschichtige und einschichtige Bauweisen verhalten sich hierbei gleichartig.

Tabelle 3-8: Höchste aufgetretene Abflussbeiwerte während und nach einem Niederschlagsereignis von  $r_{15} = 300 \text{ l/s}\cdot\text{ha}$  /Liesecke; 1995/

Bauweise	Aufgetretene Abflussbeiwerte $\psi_{(s)}$		
	während des Niederschlages	15 Minuten danach	nach weiteren 15 Minuten
0 Dachabdichtung	1,0	-	-
1 Kiesschüttung, 7 cm dick	0,8	0,2	-
2 Mehrschichtige Bauweise, 10-12 cm dick; mit Fadengeflecht-Dränmatte	0,7	0,3	-
3 Mehrschichtige Bauweise, 10-12 cm dick; mit Drän- und Substratplatte	0,5	0,3	0,1
4 Mehrschichtige Bauweise, 10-12 cm dick; mit Schüttstoff-Dränschicht	0,2	0,4	0,2
5 Einschichtige Bauweise, 10-12 cm dick, mit Lava-Bims-Gemisch	0,2	0,4	0,3
6 Einschichtige Bauweise, 6-8 cm dick	0,2	0,3	0,2

In Tabelle 3-9 gibt Liesecke die nach dem derzeitigen Untersuchungs- und Erkenntnisstand bei Dachbegrünungen mit einem Gefälle bis 5 % in Abhängigkeit von der Aufbaudicke anzusetzenden Spitzenabflussbeiwerte an. Für die beiden letztgenannten Flächentypen ergaben die Untersuchungen bei dem anzusetzenden Bemessungsregen deutlich höhere Abfluss

beiwerte, als sie in der DIN 1986/2 (1995) aufgeführt werden. Die Norm entspricht in diesem Punkt nicht dem derzeitigen Erkenntnis- und Entwicklungsstand.

Tabelle 3-9: Abgeleitete Spitzenabflussbeiwerte für Dachbegrünungen in Abhängigkeit von der Aufbaudicke bis 5 % Gefälle /Liesecke; 1998/

Art der Fläche	Abflussbeiwert $\psi_{(s)}$
Dächer mit Abdichtungen	1,0
Kiesdächer	0,8
Begrünte Dächer	
> 50 cm Aufbaudicke	0,1
25 - 50 cm Aufbaudicke	0,2
15 - 25 cm Aufbaudicke	0,3
10 - 15 cm Aufbaudicke	0,4
6 - 10 cm Aufbaudicke	0,5
4 - 6 cm Aufbaudicke	0,6
2 - 4 cm Aufbaudicke	0,7
Stärker geneigte Dächer mit erhöhtem Oberflächenabfluss unabhängig von der Dicke	0,7

### 3.3.2 Untersuchung von Kolb

Kolb beklagt in seinen Ausführungen über Regenwasserabflüsse bei Grünflächen auf Dächern, dass in der Neufassung der DIN 1986/2 von 1995 eine Benachteiligung der Dachbegrünung mit ihren nachgewiesenen ökologischen und wirtschaftlichen Vorteilen gegenüber konventionellen, bautechnisch geprägten Lösungen herrsche und die Norm dahingehend erhebliche Mängel aufweise /Kolb, 1995/. Besonders moniert er, dass die ausgeprägte Verzögerung des Regenwasserabflusses bei Dachbegrünungen in der Norm nicht berücksichtigt wurde. Er verweist hierbei auf Messungen der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, die bei Kiesflächen einen wesentlich geringeren Verzögerungseffekt gegenüber extensiv begrüntem Dächern gleicher Neigung mit einem Aufbau von 10 cm Dicke festgestellt hat. Bei Intensivbegrünungen traten die Spitzenabflussbeiwerte erst 50-150 Minuten nach Beendigung eines Bemessungsregens von 333 l/s/ha auf und betragen im Durchschnitt der untersuchten Materialien lediglich  $\psi_s = 0,026$ . Entsprechend schlägt Kolb für Intensivbegrünungen einen Spitzenabflussbeiwert von maximal 0,1 vor, der deutlich unter dem Abflussbeiwert von 0,3 nach DIN 1986/2 liegt.

### 3.4 Zusammenfassung

Der einschlägigen Literatur sind zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen zur Versickerung von Regenwasser auf teildurchlässig befestigten Flächen zu entnehmen. Neben den in Deutschland maßgebenden technischen Regelwerken wurden in diesem Kapitel ausgewählte Studien in ihren wesentlichen Punkten zusammengefasst und vorgestellt. Die einzelnen Untersuchungen befassen sich teilweise mit verschiedenen, teilweise mit ähnlichen oder identischen Befestigungsarten, so dass insgesamt ein Überblick über alle relevanten Flächenkategorien gegeben werden konnte. Vielfach wurde in den genannten Veröffentlichungen Kritik an den in der Norm enthaltenen Abflussbeiwerten und der zu undifferenzierten Flächeneinteilung geübt.

Zum Zwecke der Übersichtlichkeit werden die erläuterten Untersuchungen nochmals in tabellarischer Form zusammengefasst.

Tabelle 3-10: Überblick über die vorgestellten Untersuchungen

Verfasser (Jahr)	Kurzbeschreibung der Untersuchung
Borgwardt (1994)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– kritische Anmerkungen zur DIN 1986/2 (1978) und den späteren Entwürfen (1992/94)</li> <li>– Vorschlag für Spitzenabflussbeiwerte verschiedener Flächenbefestigungen unter Bezug auf Untersuchungsergebnisse aus der Literatur</li> </ul>
Borgwardt (1995)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Untersuchung von Pflasterflächen verschiedenen Alters in situ mittels Tropfinfiltrrometer</li> <li>– Darstellung der Infiltrationsverläufe und Ableitung von Spitzen- und Endabflussbeiwerten in Abhängigkeit von der Regenspende</li> <li>– Bestimmung der zeitl. Veränderung der Wasserdurchlässigkeit</li> </ul>
Borgwardt (1994 u. 1995)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Untersuchung von wassergebundenen Wegbelägen verschiedenen Alters in situ</li> </ul>
Muth (1994)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Untersuchung des Versickerungs- u. Abflussverhaltens verschiedener Befestigungssysteme im Neuzustand: haufwerksporigen Pflastersteine, Pflaster mit Sickeröffnungen, Normalpflaster</li> <li>– Darstellung des Zusammengangs zw. Niederschlag, Versickerung u. Oberflächenabfluss</li> </ul>
Hanses et al. (1999)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Untersuchung von wasserdurchlässigem Pflaster auf gering durchlässigem Untergrund</li> <li>– Ausweisung eines Spitzenabflussbeiwertes</li> </ul>
Liesecke (1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Untersuchung von extensiven Dachbegrünungen verschiedener Bauweisen mit unterschiedlichen Aufbaudicken hinsichtlich Wasserrückhaltung und Regenwasserabfluss</li> <li>– Ableitung von Spitzenabflussbeiwerten von Extensivbegrünungen in Abhängigkeit von der Aufbaudicke und Vergleich zu anderen Dachkonstruktionen</li> </ul>
Kolb (1995)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– kritische Anmerkungen zur DIN 1986/2 (1995) hinsichtlich der Bewertung von begrünten Dächern unter Bezugnahme auf Untersuchungen zum Abflussverhalten von Dachbegrünungen</li> </ul>

Die Ergebnisse der vorgestellten Untersuchungen sind nur schwer miteinander zu vergleichen. Dies liegt zum einen daran, dass die durchgeführten Versuche nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet und die Ergebnisse anhand von unterschiedlichen Kenngrößen

dargestellt wurden. Manche Untersuchungsergebnisse liefern echte Abflussbeiwerte, meist Spitzenabflussbeiwerte, während andere lediglich aufnehmbare Regenspenden, maximale Versickerungsleistungen oder Durchlässigkeitsbeiwerte angegeben. Des Weiteren sind die untersuchten Flächenkategorien i. d. R. nicht identisch und können somit nicht direkt mit anderen Untersuchungen oder dem technischen Regelwerk verglichen werden. Zudem sind die Untersuchungsbedingungen teilweise sehr unterschiedlich. Borgwardt beispielsweise ermittelt vorwiegend das Versickerungsverhalten von älteren Flächen nach mehrjähriger Nutzung, während Muth seine Untersuchungen an neu verlegten Flächen durchführt. In einigen Fällen konnten aus den Ergebnissen zum Zweck der Vergleichbarkeit entsprechende Kenngrößen (Abflussbeiwerte) aus den Untersuchungsergebnissen abgeleitet werden.

Insbesondere stellt sich ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den Angaben in technischen Regelwerken als problematisch dar. Dennoch wird in nachstehender Tabelle 3-11 versucht, eine Gegenüberstellung der Spitzenabflussbeiwerte der DIN 1986/2 und den Werten in der Literatur vorzunehmen. Die Gegenüberstellung macht deutlich, dass die in der DIN 1986/2 angegebenen Werte nur teilweise durch die genannten Untersuchungsergebnisse bestätigt werden können. Insbesondere bei teildurchlässigen Flächen wie Dachbegrünungen, Sickerpflaster und wassergebundenen Flächen sind die Abweichungen recht deutlich. Die Gegenüberstellung gibt Hinweise darauf, dass die Werte der DIN 1986/2 nicht dem derzeitigen Erkenntnis- und Entwicklungsstand entsprechen.

Tabelle 3-11: Gegenüberstellung der Spitzenabflussbeiwerte der DIN 1986/2 und den Ergebnissen verschiedener Untersuchungen

Flächentyp	DIN 1986/2 (1995)	Borgwardt (1994)	Muth (1994)	Liesecke (1998)	Kolb (1995)
- Dachflächen > 3° Neigung	1,0	1,0	-	1,0	-
- Kiesdächer	0,5	<b>0,8</b>	-	<b>0,8</b>	-
- begrünte Dachflächen <sup>1)</sup>					
- für Intensivbegrünungen	0,3	0,3	-	<b>0,1 - 0,2</b>	<b>0,0 - 0,1</b>
- für Extensivbegrünungen ab 10 cm Aufbaudicke	0,3	0,3	-	0,3 - 0,4	-
- für Extensivbegrünungen unter 10 cm Aufbaudicke	0,5	0,5	-	<b>0,5 - 0,7</b>	-
- Betonsteinpflaster, in Sand oder Schlacke verlegt, Flächen mit Platten	0,7	(0,8)	(0,65)*	-	-
- Flächen mit Pflaster, mit Fugenanteil > 15 %, z. B. 10 cm x 10 cm und kleiner	0,6	0,6	<b>(0,1)*</b>	-	-
- wassergebundene Flächen	0,5	<b>0,9</b>	-	-	-

Bei Werten in Klammern sind die Abflussbeiwerte nicht unmittelbar vergleichbar, da die Flächenkategorie o. ä. nur ähnlich aber nicht identisch ist. Fett gedruckte Werte unterscheiden sich von der DIN 1986/2 (1995).

\* ) Diese Werte wurden aus den Ergebnissen von Muth für eine Regenspende von 300 l/s-ha abgeleitet.

Zur Veranschaulichung seien abschließend die ermittelten Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende für verschiedene Wegbeläge nach den Untersuchungen von Borgwardt und Muth in nachstehender Abbildung 3-7 dargestellt.

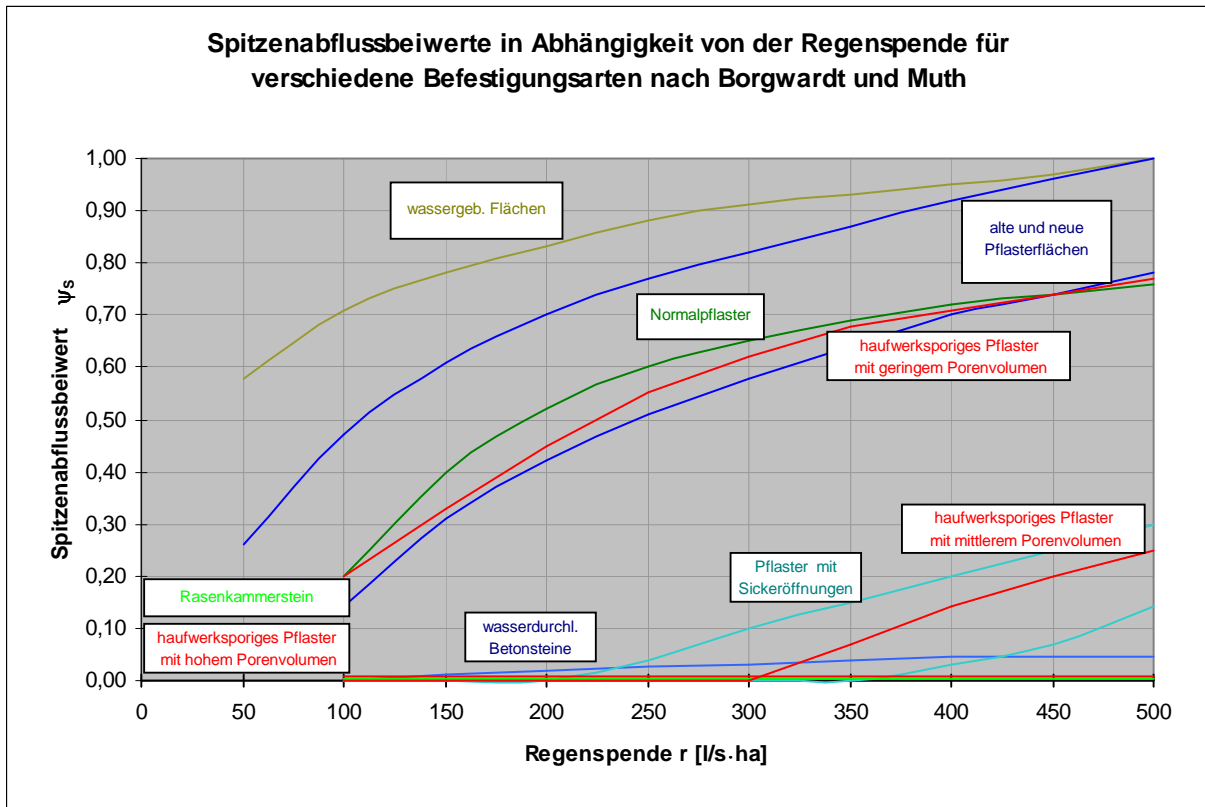


Abbildung 3-7: Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Regenspende für verschiedene Wegbeläge nach den Untersuchungen von Borgwardt und Muth

#### 4. Abflussmodell und Modellansätze zur Berechnung des Oberflächenabflusses

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Abflussbeiwerte für verschiedene Flächenarten erarbeitet und den Standardwerten der einschlägigen Literatur gegenüber gestellt werden. Die Berechnungen werden mit Hilfe des Abfluss- und Schmutzfrachtmodells KOSMO durchgeführt. Das eingesetzte Modell und die Parameter zur Berechnung des Oberflächenabflusses werden im folgenden kurz erläutert.

##### 4.1 Das Abfluss- und Schmutzfrachtmodell KOSMO

KOSMO ist ein hydrodynamisches Modell zur Simulation von Abfluss- und Schmutzstofftransportvorgängen in beliebigen Entwässerungssystemen. Die relevanten Vorgänge, die während Trocken- und Regenperioden auf der Oberfläche und im Kanalnetz des Einzugsgebietes ablaufen, werden im Modell über beliebige Zeiträume realitätsnah abgebildet /Schmitt, 1991/. KOSMO folgt in seinem Aufbau der physikalischen Verknüpfung der einzelnen Prozesse, die zum Abfluss und zum Schmutzstoffaustrag aus Kanalnetzen führen. Die Verknüpfung dieser Prozesse und ihre Abbildung im Modell sind in nachstehender Schemadarstellung aufgeführt. Für die vorliegende Untersuchung sind lediglich die Prozesse der Abflussbildung, der Abflusskonzentration sowie des Aufbaus des Verlustpotentials während der Trockenperiode maßgebend. Der Transport von Schmutzstoffen wird nicht betrachtet.

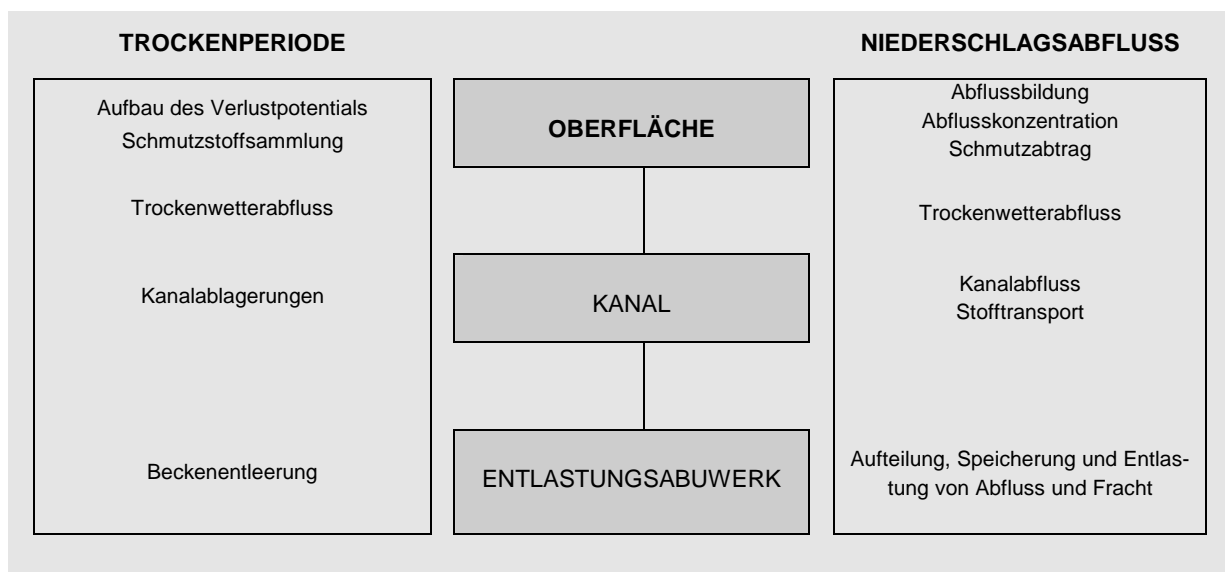


Abbildung 4-1: Modellbausteine und Prozesse im Schmutzfrachtmodell KOSMO /Schmitt, 1991/



## 4.2 Modellansätze zur Berechnung des Oberflächenabflusses

Die Berechnung des Oberflächenabflusses beschreibt die Umwandlung von Regen in Zuflusswellen zum Kanalnetz und erfasst somit alle Vorgänge, die zwischen dem Auftreffen des Regens auf die Erdoberfläche und der Übernahme der Abflüsse durch das Entwässerungssystem liegen. Die Oberflächenabflussberechnung gliedert sich in die beiden Phasen Abflussbildung und Abflusskonzentration. Die Abflussbildung bestimmt, welcher Anteil des gefallenen Niederschlages rechnerisch zum Abfluss kommt. Die Abflusskonzentration bestimmt die Form der Abflusswelle, also in welcher zeitlichen Verteilung der Abfluss auftritt /Verworn, 1993/.

### 4.2.1 Abflussbildung

Zur Ermittlung des abflusswirksamen Niederschlages werden die auftretenden Verluste erfasst. Bei den undurchlässig befestigten Flächen treten in erster Linie Benetzungs-, Mulden- und Dauerverluste auf. Bei durchlässig befestigten Flächen sind zusätzlich Versickerungsverluste zu berücksichtigen.

Die Benetzung der Oberfläche wird im Modell als Anfangsverlust mit vorgegebener Verlusthöhe bilanziert, die zu Beginn eines Regenereignisses von den Niederschlagshöhen der einzelnen Zeitintervalle abgezogen wird. Die Benetzungsverluste bei durchlässigen Flächen können aufgrund der Rauigkeit der Oberfläche und der Vegetationsdecke wesentlich höhere Werte annehmen als bei undurchlässigen Flächen /Sieker, 1988/. Die vorgegebenen Benetzungsverluste beziehen sich auf die Sommermonate Mai bis August. Darüber hinaus wird in der vorliegenden Untersuchung der Einfluss der Jahreszeit auf die Benetzung bei Langzeitsimulationen mit Niederschlagsreihen berücksichtigt. Hierzu sind in das Abfluss- und Schmutzfrachtmodell KOSMO die in nachstehender Tabelle 4-1 aufgeführten Reduzierungsfaktoren implementiert, über die die Benetzungswerte in den Wintermonaten abgemindert und so der geringeren Interzeption aufgrund der reduzierten Vegetation Rechnung getragen wird /Schmitt, 2000/.

Tabelle 4-12: Reduzierungsfaktoren der sommerlichen Benetzungswerte /Schmitt, 2000/

Monat	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Faktor	0,1	0,1	0,3	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,7	0,3	0,1

Ein Teil des Niederschlages wird in Unebenheiten der Oberfläche zurückgehalten und am Abfluss gehindert. In der Realität erschöpft sich die Rückhaltefähigkeit der Mulden bei fortwährendem Niederschlag entsprechend der heterogenen Zusammensetzung aus Unebenheiten verschiedener Größe und verschiedener Speicherfähigkeit, bis letztlich alle

Mulden gefüllt sind. Der Muldenverlust ist also ein zeitlich veränderlicher Vorgang, der sich asymptotisch einem Endwert (Dauerverlust) annähert /Verworn, 1993/. Zwischen dem Benetzungsverlust und dem Muldenverlust besteht ein fließender Übergang. Entsprechend der Empfehlung des ATV-Merkblattes M 165 werden daher im Rahmen der vorliegenden Untersuchung Benetzungs- und Muldenverluste vereinfachend gemeinsam als Anfangsverlust zusammengefasst /ATV, 1994/. Eine zeitliche Veränderung der (Mulden-)Verlustrhöhe wird nicht berücksichtigt. Diese Handhabung wird hinsichtlich der Genauigkeit der errechneten Ergebnisse als ausreichend erachtet.

In niederschlagsfreien Perioden findet, in erster Linie infolge von Verdunstung, ein Abtrocknen der Oberfläche und damit eine Regeneration der Benetzung sowie der Muldenauffüllung statt. Diesem Sachverhalt ist bei Langzeitbetrachtungen Rechnung zu tragen. Das Modell KOSMO bestimmt den Grad der Wiederherstellung der Anfangsverlustrhöhen bis zum Beginn des nächsten Niederschlagsereignisses über monatlich konstante Verdunstungsraten. Das Verlustpotential der Oberfläche bei Ende des vorangegangenen Ereignisses (Restpotential) wird dabei berücksichtigt. Die monatlichen Verdunstungsraten sind in Tabelle 4-2 dargestellt.

Tabelle 4-13: Mittlere Monatswerte der täglichen Verdunstung (VDR in mm/d) /Verworn, 1993/

Monat	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Faktor	0,5	0,8	1,2	2,0	2,9	3,3	3,4	2,8	1,9	1,1	0,8	0,5

Dauerverluste können in "regenbezogene" und "flächenbezogene" Verluste unterteilt werden. Regenbezogene Dauerverluste sind Verdunstungsverluste, die über die Regeneration der Verlustrhöhen erfasst werden. Flächenbezogene Dauerverluste müssten bei undurchlässigen Flächen berücksichtigt werden, wenn nicht nur vollständig abflusswirksame Flächenanteile betrachtet werden /Verworn, 1993/. Durch die strikte Differenzierung nach der Art der Flächenbefestigung sind jedoch bei der vorliegenden Untersuchung keine flächenbezogenen Dauerverluste zu berücksichtigen.

Bei durchlässig befestigten Flächen muss die Berechnung der Abflussbildung um die Komponente Versickerung erweitert werden. Die Infiltrationskapazität des Bodens hängt zum einen ab von der Durchlässigkeit des Bodens, zum anderen vom aktuellen Wassergehalt, der sich während eines Regenereignisses und in Trockenzeiten ändert. Das Modell KOSMO bestimmt die momentane Versickerungskapazität über einen erweiterten Ansatz nach Horton. 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 4-1 ausgedrückt.

Gleichung 4-1: Allgemeine Gleichung der Infiltrationsrate nach Horton /Verworn, 1993/

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

mit:  $f(t)$  = Infiltrationsrate zur Zeit  $t$  (l/s·ha)  
 $f_0$  = Anfangsinfiltrationsrate zur Zeit  $t = 0$  (l/s·ha)  
 $f_e$  = Endinfiltrationsrate zur Zeit  $t = \infty$  (l/s·ha)  
 $k$  = Abnahmekoeffizient während des Regenereignisses (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 im Modell KOSMO eingearbeitete rekursive Berechnungsgleichung lautet nach Gleichung 4-2:

Gleichung 4-2: Rekursive Berechnungsgleichung der Infiltrationsrate nach Horton /Verworn, 1993/

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

mit:  $f_i$  = Infiltrationsrate des  $i$ -ten Intervalls (l/s·ha)  
 $f_{i-1}$  = Infiltrationsrate des vorangegangenen Intervalls (l/s·ha)  
 $f_e$  = Endinfiltrationsrate zur Zeit  $t = \infty$  (l/s·ha)  
 $k$  = Abnahmekoeffizient während des Regenereignisses (1/min)  
 $\Delta t$  = Intervalllänge

Ähnlich den Benetzungs- und Muldenverlusten findet in niederschlagsfreien Zeitabschnitten eine Regeneration des Verlustpotentials statt. Für die Regenerierung der Infiltrationskapazität in Trockenperioden wird die Umkehrung der obigen Gleichung angesetzt. Hierbei kennzeichnet der Regenerationskoeffizient  $k_d$  den zeitlichen Verlauf des Wiederanstiegs der potentiellen Infiltrationskapazität. Da die Regeneration des Versickerungsvermögens im wesentlichen auf der Evaporation beruht, verläuft sie im allgemeinen wesentlich langsamer als der Rückgang der Infiltrationsrate während des Niederschlags /Sieker, 1988/. Die formelmäßige Beschreibung der Regeneration der Infiltration ist in Gleichung 4-3 dargestellt.

Gleichung 4-3: Berechnungsgleichung der Regeneration der Infiltrationsrate nach Horton /Verworn, 1993/

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

mit:  $f_i$  = Infiltrationsrate des  $i$ -ten Intervalls (l/s·ha)  
 $f_{i-1}$  = Infiltrationsrate des vorangegangenen Intervalls (l/s·ha)  
 $k_D$  = Regenerationskoeffizient während der Trockenphase (1/min)

Gleichung 4-2 gilt unter der Voraussetzung, dass die Regenbelastung mindestens so groß wie die Infiltrationsrate ist, d.h. die Versickerungskapazität ausgeschöpft wird. Gleichung 4-3 beschreibt die Regeneration des Versickerungsvermögens während der Trockenzeit, bei der gleichzeitig keine Infiltration stattfindet. Für den Fall eines Regens, der eine geringere Intensität als die aktuelle Versickerungsrate aufweist, sind die beiden Gleichungen nicht direkt anwendbar. Bei derartigen Niederschlägen muss das betrachtete Intervall in die beiden Anwendungsfälle von Gleichung 4-2 und Gleichung 4-3 zerlegt werden. Der Niederschlag wird in der Art rechnerisch umverteilt, dass die momentane Infiltrationskapazität gerade ausgeschöpft ist und eine vollständige Versickerung des Niederschlages erfolgt. Der zugehörige Zeitabschnitt wird iterativ ermittelt. Für die verbleibende Restzeit des betrachteten Intervalls wird dann die oben beschriebene Regeneration der Infiltrationskapazität angesetzt.

Abbildung 4-2 zeigt die Handhabung dieses Niederschlagszenarios in schematischer Darstellung.

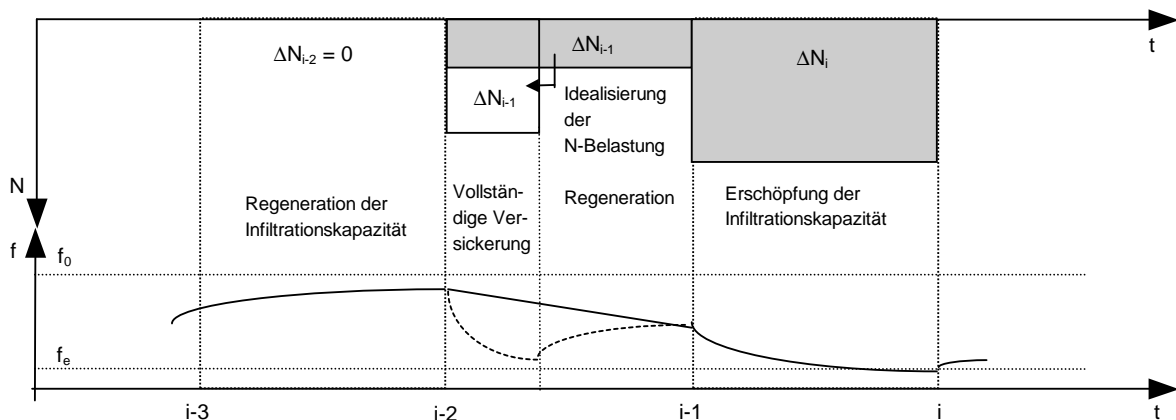


Abbildung 4-2: Umverteilung der Niederschlagshöhe bei Ereignissen geringerer Intensität nach erweitertem Horton-Ansatz /Verworn, 1993/

Die formelmäßige Beschreibung der kumulativen Infiltrationsrate  $\Delta F_i$  ergibt sich nach Pausen wie folgt:

Gleichung 4-4: Kumulative Infiltrationsrate nach Horton /Verworn, 1993/

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

### 4.2.2 Abflusskonzentration

An die Berechnung der Abflussbildung schließt sich die Berechnung der Abflusskonzentration an, die die Umwandlung des flächenhaft verteilten abflusswirksamen Niederschlages in die Abflussganglinie des betrachteten Gebietes beschreibt. Dabei spielen Verzögerungseffekte (Retention) und Fließvorgänge auf der Oberfläche (Translation) eine Rolle /ATV, 1994/. Die Transformation des Effektivniederschlages in einen Abfluss von der Oberfläche wird im Abfluss- und Schmutzfrachtmodell KOSMO unter Berücksichtigung der dabei auftretenden Translations- und Retentionseffekte über den Ansatz der Linearspeicherkaskade simuliert. Hierbei wird standardmäßig eine Kaskade aus drei in Reihe geschalteten Speichern mit der Speicherkonstanten  $k$  angesetzt. Die Abflussganglinie für eine Teilgebietsfläche ergibt sich aus der Faltung der Systemfunktion mit dem Verlauf des Effektivniederschlages gemäß den nachstehenden Gleichungen /Schmitt, 1991/.

$$\text{Gleichung 4-5:} \quad q(m) = \sum_{j=1}^m i(j) \cdot u(n-j+1) \cdot \Delta t \quad [\text{mm/min}]$$

$$\text{Gleichung 4-6:} \quad u(t) = \frac{1}{k \cdot (n-1)} \cdot \left(\frac{1}{k}\right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad [-]$$

$$\text{Gleichung 4-7:} \quad k = 0,25 \cdot (t_a + t_f) \quad [\text{min}]$$

- mit:
- $q(m)$  = Abflussspende im Zeitintervall  $m$
  - $i$  = Niederschlagsintensität [mm/min]
  - $u$  = Systemfunktion [-]
  - $k$  = Speicherkonstante [min]
  - $n$  = Speicheranzahl [-]
  - $t_a$  = Fließzeit auf der Oberfläche in Abhängigkeit der Geländeneigung [min]
  - $t_f$  = Fließzeit im Kanal gemäß Kanalnetzrechnung [min]

## 5. Niederschlag-Abfluss-Simulation

### 5.1 Untersuchungsablauf

Ziel der Untersuchung ist es, durch systematische Modellberechnungen die Kompatibilität empfohlener Standardwerte mit den Berechnungsergebnissen von Abflussmodellen der Siedlungsentwässerung zu untersuchen. Im Rahmen dieser Arbeit werden der mittlere Abflussbeiwert, der Endabflussbeiwert sowie der Spitzenabflussbeiwert für gängige Befestigungsarten betrachtet. Unter Vorgabe in der Literatur empfohlener Modellparameter zur Abflussbildung wird für verschiedene Niederschlagsbelastungen der Oberflächenabfluss anhand des Niederschlag-Abflussmodells KOSMO berechnet. Die Größe der Parameter zu Benetzungs-, Mulden- und Versickerungsverlust bestimmen hierbei die Höhe des abflusswirksamen Niederschlages. Aus der Bilanzierung des Niederschlag-Abfluss-Verhaltens werden die einzelnen Abflussbeiwerte des jeweiligen Flächentyps ermittelt.

In der ersten Untersuchungsphase werden Einheitsflächen mit einer Größe von jeweils 1000 m<sup>2</sup> betrachtet und die zugehörigen Abflussbeiwerte berechnet. In einem zweiten Untersuchungsschritt werden zwei fiktive Einzugsgebiete, ein ländlich bis kleinstädtisch strukturiertes Gebiet sowie ein verdichtetes, städtisches Kerngebiet, untersucht und die Abflussbeiwerte der Gesamtgebiete für verschiedene Befestigungsszenarien bestimmt. In der Auswertung der Berechnungsergebnisse werden die angesetzten Modellparameter und die ermittelten Abflussbeiwerte den Angaben in der Literatur gegenübergestellt und diskutiert.

### 5.2 Untersuchte Flächentypen

Das Spektrum der in die Untersuchung einbezogenen Flächentypen reicht von undurchlässigen Befestigungen bis zu durchlässig befestigten Flächen und deckt die Bandbreite in der Praxis vorkommender Flächenarten im wesentlichen ab. Die Untersuchung beinhaltet Dachflächen unterschiedlichen Aufbaus (Schrägdächer, Flachdächer, Gründächer) sowie zahlreiche Straßen- und Wegbefestigungen. Daneben werden befestigte und unbefestigte Siedlungsflächen als pauschale Flächentypen analog der bislang gängigen Verfahrensweise bei der Niederschlag-Abfluss-Simulation gesondert betrachtet und untersucht. Eine Übersicht über die betrachteten Flächentypen sowie die zu erwartenden Größen für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert nach Schmitt /Schmitt, 2000/ sind in nachstehender Tabelle 5-1 zusammengestellt.

Die in die Untersuchung einbezogenen Flächentypen werden Bestandteil des derzeit im Entwurf befindlichen ATV-Arbeitsblattes „Bemessungsgrundlagen für Abwasseranlagen“ sein und finden sich in ähnlicher Aufstellung in ATV-Merkblatt M 153 „Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser“.

Tabelle 5-1: Übersicht der untersuchten Flächentypen

Flächentyp	Nr.	Art der Befestigung	Richtwerte	
			$\Psi_m$ [-]	$\Psi_e$ [-]
Dachflächen	1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	> 0,90	1,00
	2	Schrägdach - Ziegel, Dachpappe	> 0,80	1,00
	3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	> 0,90	1,00
	4	Flachdach - Dachpappe	0,90	1,00
	5	Flachdach - Kies	0,70	0,90
	6	Gründach - Aufbau < 10 cm	0,50	0,80
	7	Gründach - Aufbau $\geq$ 10 cm	0,30	0,60
Straßen- und Wegflächen	8	Asphalt, fugenloser Beton	0,90	1,00
	9	Pflaster fugendicht	0,75	0,90
	10	Pflaster mit Fugen	0,50	0,70
	11	Kiesbelag fest	0,60	0,80
	12	Kiesbelag locker	0,30	0,60
	13	Schotterrasen	0,30	0,60
	14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	0,25	0,50
	15	Rasengittersteine	0,15	0,40
Siedlungsflächen	16	befestigte Flächen (pauschal)	0,95	1,00
	17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	0,20	0,30

Besonderes Augenmerk liegt im Rahmen dieser Untersuchung auf den durchlässig befestigten Flächen, die bei bisherigen Niederschlag-Abfluss-Simulationen derart detailliert nicht berücksichtigt worden sind. Die Vorgabe von Verlustparametern stellt sich bei diesen Flächen als schwierig dar, da diesbezüglich keinerlei Erfahrung aus der Simulationspraxis besteht und somit keine gesicherten Werte für die vorzugebenden Modellparameter zur Verfügung stehen.

### 5.3 Angesetzte Parameterwerte zur Berechnung des Oberflächenabflusses

Nachstehend werden die Wertebereiche der Modellparameter dargestellt, die zur Berechnung des Oberflächenabflusses mittels des Abfluss- und Schmutzfrachtmodells KOSMO angesetzt werden. Bei der Wahl der Parameterwerte wird soweit möglich auf Standardwerte der einschlägigen Literatur zurückgegriffen.

Für die in dieser Arbeit betrachtete Fragestellung ist die Abflussbildung von weitaus größerer Bedeutung als die Abflusskonzentration, da hier der Inhalt der Abflusswellen, also die Gesamtmenge des Abflusses aus den gefallen Niederschlägen bestimmt wird. Der richtige Ansatz der Verluste unter Berücksichtigung der Oberflächencharakteristiken ist maßgebend für das Ergebnis der Gesamtuntersuchung /ATV, 1984/. Entsprechend sind die Modellparameter zur Berechnung der Abflussbildung sorgfältig zu wählen.

Schmitt gibt die nachstehenden Wertebereiche für die Benetzungs- und Muldenverluste verschiedener Flächenbefestigungen an /Schmitt, 2000/ und übernimmt hierbei größtenteils die Vorgaben des ATV-Arbeitsblattes A 119 "Grundsätze für die Berechnung von Entwässerungsnetzen mit elektronischen Datenverarbeitungsanlagen".

– Benetzungsverluste:	befestigte Flächen	0,2 - 0,5 mm
	unbefestigte Flächen	0,2 - 1,0 mm
– Muldenverluste:	glatte Dachflächen	0,2 - 1,0 mm
	befestigte Straßen-/Hofflächen	0,4 - 2,0 mm
	sonstige befestigte Flächen	0,5 - 2,5 mm
	unbefestigte Flächen	1,0 - 5,0 mm

In der Fachliteratur finden sich keine Angaben über Parameterwerte zur Bestimmung der Infiltration nach Horton, die mit den hier betrachteten teildurchlässigen Flächentypen kompatibel sind, da bislang bei der Berechnung mit Abfluss- und Schmutzfrachtmodellen keine detaillierte Differenzierung nach der Art der Flächenbefestigung vorgenommen wurde. Die in der Literatur genannten Werte der Modellparameter (u.a. Pecher, 1969; James, 1998, Scholz, 2000) beziehen sich vorwiegend auf die pauschale Betrachtung unbefestigter Flächen innerhalb eines Einzugsgebietes und erstrecken sich über einen weiten Wertebereich /Schmitt, 2000/:

– Versickerungsparameter:	Anfangsversickerungsrate	50 - 300 l/s-ha
	Endversickerungsrate	5 - 30 l/s-ha
	Abnahmekoeffizient	0,03 - 0,2 1/min
	Regenerationskoeffizient	0,001 - 0,0001 1/min

Paulsen gibt nachstehende Infiltrationsparameter für unbefestigte Flächen in Abhängigkeit von der Bodenart an /Paulsen, 1986/.



Tabelle 5-2: Bodenarten und Parameter für den erweiterten Ansatz nach Horton /Paulsen, 1986/

Parameter		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 einschlägigen Literatur angegebenen Verlustparameter sind hinsichtlich der Art der Flächenbefestigung nur wenig differenziert. Die Werte der Versickerungsparameter nach Horton für unbefestigte Flächen können bei der Betrachtung von durchlässig befestigten Flächenarten, wie sie im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen wird, lediglich als Richtwerte dienen.

Zur Berechnung des Oberflächenabflusses im Rahmen dieser Untersuchung werden die oben genannten Wertebereiche der Verlustparameter aus der Fachliteratur aufgegriffen und den einzelnen Flächentypen unter Berücksichtigung der individuellen Oberflächenbeschaffenheit und des Abflussverhaltens gezielte Benetzungs- und Muldenverluste zugeordnet. Eine Festlegung der Parameterwerte der Versickerungsverluste für die durchlässigen Flächenbefestigungen erfolgt aufgrund des Mangels an zuverlässigen Erfahrungswerten durch Anpassung an die zu erwartenden Abflussbeiwerte nach Schmitt (Zielwerte) /Schmitt, 2000/, wie sie in Tabelle 5-1 aufgeführt sind.

Die Anpassung der Versickerungsparameter wird für ein Niederschlagsereignis konstanter Intensität (Blockregen) mit einer Dauer von zwei Stunden bei einer Niederschlagshöhe von 25 Millimetern vorgenommen. Die Versickerungsparameter – Anfangsinfiltration, Endinfiltration und Abnahmekoeffizient – werden hierbei derart gewählt, dass die errechneten Endabflussbeiwerte möglichst genau mit den Richtwerten aus Tabelle 5-1 übereinstimmen. Die Wahl des Niederschlagsereignisses, für das die Anpassung der Versickerungsparameter vollzogen wird, erfolgt unter der Annahme, dass die betrachteten Abflussbeiwerte vorwiegend in Zusammenhang mit Blockregenereignissen und weniger in Zusammenhang mit Modellregen oder Regenreihen Anwendung bei der praktischen Berechnung von Niederschlagsabflüssen finden. Die Anpassung an ein Blockregenereignis erscheint daher sinnvoll. Mit einem Ereignis der Dauer von zwei Stunden und einer Niederschlagshöhe von 25 Millimetern wurde ein größeres Ereignis gewählt, das in der Größenordnung bemessungsrelevanter Regenhäufigkeiten liegt.

Die Ergebnisse der Anpassung sind in Tabelle 5-3 zusammengestellt. Die angesetzten Werte der Verlustparameter bilden die Basis für die nachfolgenden Untersuchungen des Niederschlag-Abflussverhaltens der ausgewählten Flächenbefestigungen. Sie gelten für Flächen

geringer Neigung. Bei stärker geneigten Flächen würde sich ein größerer Oberflächenabfluss einstellen. Die Verlustparameter wären dann entsprechend zu verringern.

Tabelle 5-3: Verlustparameter zur Simulation des Niederschlag-Abfluss-Verhaltens

Angesetzte Modellparameter und Zielwerte der Abflussbeiwerte											
Nr.	Flächenbefestigung	Modellparameter						Zielwerte		Ergebnis	
		$h_{v,B}$ [mm]	$h_{v,M}$ [mm]	$f_0$ [l/s.ha]	$f_e$ [l/s.ha]	$k$ [1/min]	$k_D$ [1/min]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	-	-	-	-	> 0,90	1,00	0,99	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	0,4	-	-	-	-	-	> 0,80	1,00	0,98	1,00
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	-	-	-	-	> 0,90	1,00	0,99	1,00
4	- Dachpappe	0,4	-	-	-	-	-	0,90	1,00	0,98	1,00
5	- Kies	0,4	2,6	4	4	-	-	0,70	0,90	0,77	0,89
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	0,6	3,9	50	7	0,20	0,0005	0,50	0,80	0,61	0,79
7	- Aufbau $\geq$ 10 cm	0,8	5,2	83	11	0,10	0,0005	0,30	0,60	0,36	0,60
8	Asphalt, fugenloser Beton	0,4	1,6	-	-	-	-	0,90	1,00	0,92	1,00
9	Pflaster fugendicht	0,4	1,6	4	4	-	-	0,75	0,90	0,81	0,89
10	Pflaster mit Fugen	0,4	2,6	12	12	-	-	0,50	0,70	0,57	0,69
11	Kiesbelag fest	0,4	2,1	8	8	-	-	0,60	0,80	0,70	0,80
12	Kiesbelag locker	0,5	3,5	17	17	-	-	0,30	0,60	0,43	0,69
13	Schotterrasen	0,6	3,4	25	17	0,20	0,0005	0,30	0,60	0,43	0,59
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	0,6	3,9	21	21	-	-	0,25	0,50	0,32	0,50
15	Rasengittersteine	0,8	5,2	35	28	0,15	0,0005	0,15	0,40	0,15	0,39
16	befestigte Flächen (pauschal)	0,4	2,0	-	-	-	-	0,95	1,00	0,95	1,00
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	1,0	5,0	117	30	0,10	0,0005	0,20	0,30	0,04	0,28

Nach Schmitt ist bei zahlreichen durchlässig befestigten Flächen nicht damit zu rechnen, dass die Versickerungsrate entsprechend dem Ansatz von Horton von einem hohen Anfangswert  $f_0$  mit zunehmender Bodensättigung auf einen Endwert  $f_e$  abnimmt /Schmitt, 2000/. Mit Ausnahme der Flächentypen Nr. 6, Nr. 7, Nr. 13, Nr. 15 und Nr. 17 (Gründächer, Schotterrasen, Rasengittersteine, pauschal unbefestigte Flächen) wird daher mit einer konstanten Versickerungsintensität gerechnet. Entsprechend entfällt hier die Regeneration des Versickerungsvermögens während der Trockenperioden.

#### 5.4 Berechnung der Abflussbeiwerte

Durch Vorgabe der in Tabelle 5-3 aufgeführten, flächenspezifischen Modellparameter zur Abflussbildung wird mit dem Abflussmodell KOSMO das Niederschlag-Abfluss-Verhalten der betrachteten Flächenarten simuliert. Hierbei werden die jeweiligen Einzelverlusthöhen - Benetzungs-, Mulden- und Versickerungsverlusthöhe - berechnet und der abflusswirksame Niederschlag sowie der resultierende Oberflächenabfluss bestimmt. Die einzelnen Abflussbeiwerte ergeben sich aus der Bilanzierung der Verlusthöhen und des Oberflächenabflusses der Einzelflächen entsprechend den nachfolgenden Definitionsgleichungen:

$$\text{– Mittlerer Abflussbeiwert } \psi_m: \quad \psi_m = 1 - \frac{h_{v,B+M} + h_{v,D}}{h_N} \quad (1)$$

$$\text{– Endabflussbeiwert } \psi_e: \quad \psi_e = 1 - \frac{h_{v,D}}{h_N} \quad (2)$$

$$\text{– Spitzenabflussbeiwert } \psi_s: \quad \psi_s = \frac{q_{\max}}{r_{\max}} \quad (3)$$

Der mittlere Abflussbeiwert errechnet sich nach Gleichung (1) aus dem Niederschlagsanteil, der durch Benetzung, Muldenauffüllung und Versickerung am oberflächigen Abfluss gehindert wird und gibt somit das mittlere Verhältnis des Abflussvolumens zum Niederschlagsvolumen an. Die Gleichung gilt sowohl für beliebige Einzelereignisse als auch für Langzeitbetrachtungen.

Die Definitionsgleichung des Endabflussbeiwertes stellt sich dagegen als nicht allgemein anwendbar dar. Die Gleichung ist auf das Ziel ausgerichtet, den abflusswirksamen Niederschlagsanteil von durchlässig befestigten Flächen zu erfassen. Der Endabflussbeiwert wird daher als der durch die Versickerung reduzierte Niederschlagsanteil definiert. Diese Definition erscheint sinnvoll und hinsichtlich der Zielorientierung der Untersuchung zweckmäßig, birgt aber die Problematik, dass die Gleichung für Niederschläge geringer und mittlerer Intensität bzw. für Niederschläge hoher Häufigkeiten unzutreffend hohe Werte liefert. Dies liegt darin begründet, dass bei der Niederschlag-Abfluss-Simulation die Anfangsverluste von der Regenhöhe abgezogen werden, bevor Versickerungsverluste berücksichtigt werden. Bei schwächeren Regen, führt dies dazu, dass die Anfangsverluste einen Großteil der Niederschlagshöhe abdecken und rechnerisch zu geringe Versickerungsverluste auftreten. In der Realität erfolgen Muldenauffüllung und Versickerung jedoch nicht nacheinander, sondern nahezu parallel, so dass sich höhere Versickerungsverluste einstellen, als sich rechnerisch ergeben. Hier besteht eine Diskrepanz zwischen den Vorgängen in der Realität und deren Nachbildung im Modell, die Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der Berechnungsergebnisse des Endabflussbeiwertes hat. Für schwächere Regen, bei denen die Verlusthöhen die Niederschlagshöhe abdecken und somit kein Oberflächenabfluss entsteht, ist diese Definitionsgleichung des Endabflussbeiwertes nicht anwendbar. Von diesem Effekt sind besonders diejenigen Flächentypen betroffen, die hohe Anfangsverluste und geringe mittlere Abflussbeiwerte aufweisen, da hier eine große Niederschlagshöhe durch Benetzungs- und Muldenverluste eingenommen wird, bevor im Modell die Versickerung des Niederschlags

einsetzt. Die Definition besitzt daher nur Gültigkeit für Niederschläge, bei denen das Versickerungsvermögen der betrachteten Fläche ausreichend zum Tragen kommt. Bei Niederschlägen geringerer Häufigkeit kommt es zu einer deutlichen Überschreitung der Versickerungskapazität und zu einem nennenswerten Oberflächenabfluss. Für derartige Niederschläge ergibt die Definitionsgleichung zutreffende Endabflussbeiwerte. Die Abweichungen der Abflussbildungsansätze im Modell gegenüber den Abflussvorgängen in der Realität bewegen sich dann in dem für eine Modellsimulation vertretbarem Ausmaß. Da im Rahmen dieser Arbeit vorwiegend stärkere Niederschlagsereignisse, die für die Bemessung von Entwässerungsanlagen relevant sind, betrachtet werden, wird die Definitionsgleichung (2) des Endabflussbeiwertes für den Anwendungsbereich der folgenden Untersuchungen als geeignet angesehen.

Die Definitionsgleichung (1) des mittleren Abflussbeiwertes ist von der oben erläuterten Problematik nicht betroffen, da hier die Summe der Benetzungs-, Mulden- und Versickerungsverluste zur Berechnung des Abflussbeiwertes herangezogen wird, die Verteilung der Gesamtverlusthöhe auf die einzelnen Verlustkomponenten jedoch nicht von Bedeutung ist.

Der Spitzenabflussbeiwert wird nach Gleichung (3) als Verhältnis der maximalen Regenabflussspende zur maximalen Regenspende definiert. Die Definitionsgleichung kann nur für Niederschläge konstanter Intensität gelten. Bei Niederschlägen variabler Intensität, beispielsweise einem Modellregen nach Euler-Typ 2, bei denen die Niederschlagsintensität eines Regenabschnitts die Intensitäten der übrigen Abschnitte deutlich übertrifft, würde Definitionsgleichung (3) Spitzenabflussbeiwerte liefern, die deutlich unter den mittleren Abflussbeiwerten liegen. Dies ist jedoch mit der Intention, einen Rechenhilfswert zur Bestimmung der Abflussspitze zu erhalten, nicht vereinbar, so dass die Definitionsgleichung nur auf Blockregenereignisse anwendbar ist. Diese Anwendungsbeschränkung ist insofern unproblematisch, da der Spitzenabflussbeiwert in der Bemessungspraxis i.d.R. nur in Zusammenhang mit einer Blockregenspende Eingang in die Berechnung von Entwässerungsanlagen findet.

## 5.5 Niederschlagsbelastungen

Die Größe der Abflussbeiwerte ist u.a. abhängig von der Regendauer, der Regenhöhe bzw. der Regenintensität sowie vom zeitlichen Verlauf des Regens. Je kürzer die Dauer eines Regenereignisses ist, umso geringer sind die Versickerungsverluste (bei gleichen Anfangsverlusten) woraus gemäß obigen Definitionsgleichungen höhere Abflussbeiwerte resultieren. Bei geringerer Regenhöhe oder geringerer Regenintensität ergeben sich tendenziell geringere Abflussbeiwerte. Niederschlagsereignisse variabler Intensität, beispielsweise als Modellregen nach Euler-Typ 2, liefern rechnerisch höhere Abflussbeiwerte  $\psi_m$  und  $\psi_e$  als Blockregenereignisse. Dies liegt darin begründet, dass ein großer Anteil der Regenhöhe auf ein Niederschlagsintervall sehr hoher Intensität verteilt ist, was rechnerisch zu einem großen oberflächigen Abfluss führt, da das Versickerungsvermögen in diesem Moment deutlich überschritten wird. Der hohe Versickerungsanteil der restlichen, intensitätsschwächeren

Regenintervalle fällt dagegen kaum ins Gewicht. Es zeigt sich also, dass die Niederschlagsbelastung vielfachen Einfluss auf die rechnerische Größe der Abflussbeiwerte haben kann.

Die Untersuchung der Abflussbeiwerte wird daher für unterschiedliche Niederschlagsbelastungen vollzogen. Zum einen werden verschiedene Einzelereignisse simuliert, wobei Niederschläge konstanter Intensität (Blockregen) sowie Niederschläge variabler Intensität (Modellregen) betrachtet werden. Zum zweiten erfolgt die Modellanwendung für eine neunmonatige Niederschlagsreihe als Langzeitsimulation.

Zur Bestimmung der verschiedenen Abflussbeiwerte - mittlerer Abflussbeiwert, Endabflussbeiwert und Spitzenabflussbeiwert - werden jeweils unterschiedliche Niederschlagsbelastungen maßgebend. Während der Spitzenabflussbeiwert zur Ermittlung von Maximalabflüssen zur Bemessung von Kanälen und Pumpwerken herangezogen wird, finden der mittlere Abflussbeiwert und der Endabflussbeiwert Anwendung bei der Berechnung mittlere Niederschlagsabflüsse. Dementsprechend sind bei der Untersuchung des Spitzenabflussbeiwertes Starkniederschläge als Einzelereignisse relevant, die naturgemäß von geringer Dauer und hoher Intensität sind. Bei der Untersuchung des mittleren Abflussbeiwertes und des Endabflussbeiwertes werden dagegen Niederschlagsreihen oder längere Niederschlagsereignisse geringerer Intensität betrachtet.

## 5.6 Untersuchung von Einheitsflächen

In einem ersten Berechnungsschritt werden die Abflussbeiwerte der einzelnen Befestigungstypen an Einheitsflächen mit einer Größe von jeweils 1000 m<sup>2</sup> berechnet. Die Flächengröße hat hierbei keinen Einfluss auf die Größe des abflusswirksamen Niederschlags. Dementsprechend zeigen sich der mittlere Abflussbeiwert und der Endabflussbeiwert unabhängig von der Flächengröße. Die Abflussspitze bestimmt sich dagegen sowohl über die Prozesse der Abflussbildung als auch der Abflusskonzentration. Verzögerungseffekte und Fließvorgänge auf der Oberflächen führen zu einer zeitlichen Umverteilung des Effektivniederschlags. Das Abflussmaximum und somit der Spitzenabflussbeiwert sind daher auch abhängig von der Flächengröße. Für die vorliegende Untersuchung wird die Annahme einer Flächengröße von jeweils 1000 m<sup>2</sup> als sinnvoll erachtet, um das Niederschlag-Abfluss-Verhalten realitätsnah zu simulieren.

Die Simulation des Oberflächenabflusses der betrachteten Flächentypen erfolgt anhand eines Grobnetzes, bestehend aus 18 Haltungen, an die die 17 Einheitsflächen angeschlossen sind. Eine Schemadarstellung des Grobnetzes zur Einheitsflächensimulation zeigt Abbildung 5-1.

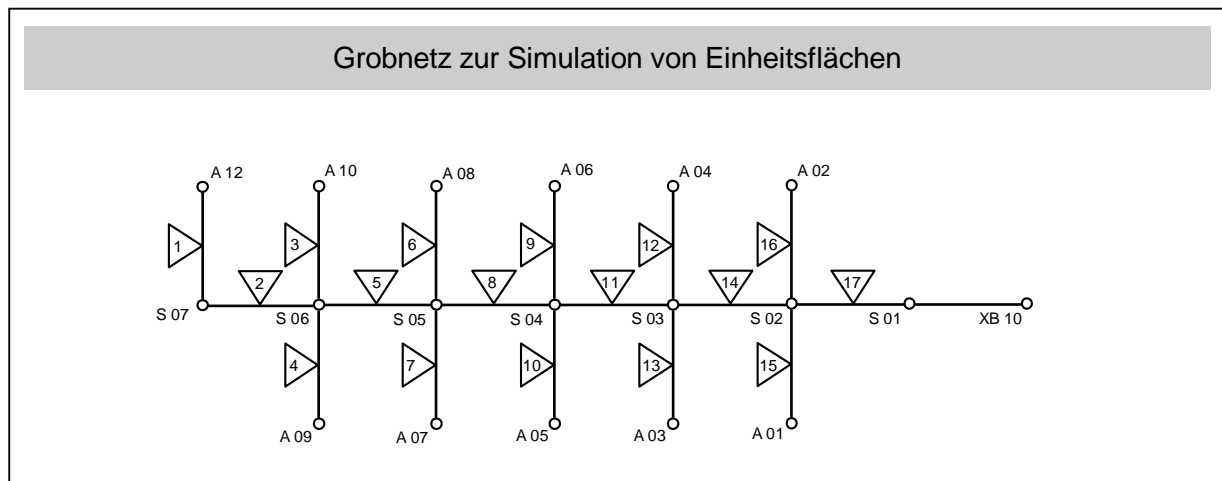


Abbildung 5-1: Schemadarstellung des Grobnetzes zur Simulation der Einheitsflächen

### 5.6.1 Einheitsflächenuntersuchung des mittleren Abflussbeiwertes und des Endabflussbeiwertes

Die Größe des Abflussbeiwertes ist, wie bereits in Kapitel 5.5 beschrieben, abhängig von der Niederschlagsbelastung. Die Erarbeitung repräsentativer Abflussbeiwerte setzt voraus, dass relevante Niederschlagsbelastungen simuliert und ausgewertet werden. Die Untersuchung des mittleren Abflussbeiwertes sowie des Endabflussbeiwertes erfolgt für folgende Niederschlagsbelastungen:

- Blockregen: Dauer 1 h mit Niederschlagshöhen von 10, 15 und 20 mm  
Dauer 2 h mit Niederschlagshöhen von 20, 25 und 35 mm
- Modellregen: Dauer 1 h mit einer Niederschlagshöhe von 15 mm  
Dauer 2 h mit einer Niederschlagshöhe von 25 mm
- Niederschlagsreihe: neunmonatige Reihe der TH Darmstadt ( $h_a = 800$  mm)

#### 5.6.1.1 Blockregen

Es werden der mittlere Abflussbeiwert und der Endabflussbeiwerte für Blockregenereignisse mit einer Dauer von 1-2 Stunden und einer Regenhöhe von 10-35 mm untersucht.

Regenereignisse lassen sich durch die drei Größen Regenspende, Regendauer und Regenhäufigkeit charakterisieren, deren Zusammenhang sich durch den Zeitbeiwert nach Reinhold beschreiben lässt. Dementsprechend lässt sich mit der Häufigkeit eines Regens eine Aussage

über dessen Größe treffen. Den für die Untersuchung herangezogenen Blockregen lassen sich bei Annahme einer Bezugsregenspende  $r_{15;1} = 120 \text{ l/s-ha}$  der Größenordnung nach folgende Häufigkeiten zuordnen:

Tabelle 5-4: Blockregen und zugehörige Häufigkeiten

Blockregen (Dauer/Regenhöhe)	Regenspende r [l/s-ha]	Regenhäufigkeit n [1/a]
1 h / 10 mm	28	2,5
1 h / 15 mm	42	1,0
1 h / 20 mm	57	0,5
2 h / 20 mm	28	0,5
2 h / 25 mm	35	0,3
2 h / 35 mm	49	0,1

Die Häufigkeiten der gewählten Blockregenereignisse entsprechen dem Häufigkeitsbereich, für den Anlagen der Siedlungsentwässerung in der Regel ausgelegt werden. Das Blockregenspektrum deckt also den für die planerische Praxis relevanten Bereich weitestgehend ab. Hinsichtlich der Anwendung des Endabflussbeiwertes gemäß ATV-Arbeitsblatt A 128 entsprechen die betrachteten Blockregenereignisse dem für die Bemessung maßgebenden, entlastungsrelevanten Belastungsspektrum.

Die Ergebnisse der Simulation der Blockregenereignisse sind in nachstehender Tabelle 5-5 angegeben und den Richtwerten gegenübergestellt. Die detaillierten Berechnungsergebnisse für die einzelnen Niederschlagsbelastungen finden sich im Anhang (Tabelle A-1 bis Tabelle A-6).

Die Übersicht der Ergebniswerte aus dem Blockregenspektrum zeigt, inwieweit die berechneten Abflussbeiwerte von der Größe der Niederschlagsbelastung abhängen. Bei den betrachteten Niederschlägen mit Häufigkeiten von  $0,1\text{-}2,5 \text{ a}^{-1}$  ist der mittlere Abflussbeiwert der untersuchten Flächentypen im Durchschnitt einer Schwankungsbreite von ca. 0,25, der Endabflussbeiwert durchschnittlich einer Schwankungsbreite von ca. 0,10 unterworfen. Hierbei weisen die Flächentypen mit zunehmender Durchlässigkeit größerer Schwankungsbreiten auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Abhängigkeit der Abflussbeiwerte von der Niederschlagsbelastung vorwiegend über die Versickerung vollzieht. Entsprechend zeigen die weitestgehend undurchlässigen Flächen, bei denen keine Versickerung stattfindet, keine nennenswerte Abhängigkeit von der Regenbelastung. Es zeigt sich weiter, dass für das untersuchte Blockregenspektrum die Größe der Niederschlagsbelastung die Größe des mittleren Abflussbeiwertes in stärkerem Maße beeinflusst, als die Größe des Endabflussbeiwertes. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Angabe expliziter Zahlenwerte für die jeweiligen Abflussbeiwerte nur bezogen auf eine bestimmte Niederschlagsbelastung erfolgen kann. Analog gilt dies für die Vorgabe von Modellparametern zur Abflussbildung, die in ähnlicher Art und Weise von der Niederschlagsbelastung abhängen.

Tabelle 5-5: Simulationsergebnisse aus Blockregenspektrum für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert

Minimale und maximale Werte aus Blockregenspektrum						
Nr.	Flächenbefestigung	Verlustrhöhe $h_{v,D}$ [mm]	Ergebnis		Richtwerte	
			$\Psi_m$ [-]	$\Psi_e$ [-]	$\Psi_m$ [-]	$\Psi_e$ [-]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	-	0,98 - 0,99	1,00	> 0,90	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	-	0,96 - 0,99	1,00	> 0,80	1,00
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	-	0,98 - 0,99	1,00	> 0,90	1,00
4	- Dachpappe	-	0,96 - 0,99	1,00	0,90	1,00
5	- Kies	0,4 - 2,8	0,59 - 0,84	0,89 - 0,93	0,70	0,90
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	1,3 - 5,5	0,29 - 0,71	0,74 - 0,84	0,50	0,80
7	- Aufbau $\geq$ 10 cm	2,9 - 10,9	0,00 - 0,52	0,54 - 0,69	0,30	0,60
8	Asphalt, fugenloser Beton	-	0,80 - 0,94	1,00	0,90	1,00
9	Pflaster fugendicht	0,6 - 2,9	0,68 - 0,86	0,84 - 0,93	0,75	0,90
10	Pflaster mit Fugen	1,0 - 7,9	0,38 - 0,69	0,68 - 0,80	0,50	0,70
11	Kiesbelag fest	0,8 - 5,3	0,54 - 0,78	0,79 - 0,87	0,60	0,80
12	Kiesbelag locker	2,0 - 10,9	0,23 - 0,58	0,63 - 0,75	0,30	0,60
13	Schotterrasen	2,0 - 11,0	0,21 - 0,57	0,61 - 0,74	0,30	0,60
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	3,2 - 13,1	0,13 - 0,50	0,57 - 0,69	0,25	0,50
15	Rasengittersteine	1,9 - 16,8	0,00 - 0,35	0,30 - 0,63	0,15	0,40
16	befestigte Flächen (pauschal)	-	0,78 - 0,93	0,95 - 1,00	0,95	1,00
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	3,6 - 21,6	0,00 - 0,21	0,28 - 0,42	0,20	0,30

Des Weiteren ist aus den Berechnungsergebnissen zu erkennen, dass sich die Richtwerte der Größenordnung nach durch die berechneten Abflussbeiwerte bestätigen lassen. Dies war zu erwarten, da als Ausgangspunkt der Berechnungen die Modellparameter zur Versickerung aus Mangel an gesicherten Erfahrungswerten an die Richtwerte angepasst wurden. Entsprechend wird bei dem zugrunde gelegten Anpassungsereignis, einem zweistündigen Blockregen mit einer Niederschlagshöhe von 25 Millimetern ( $n \approx 0,25$ ), eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten Endabflussbeiwerte mit den Richtwerten erreicht (siehe Tabelle A-5). Für die mittleren Abflussbeiwerte ergibt sich bei dem Blockregenereignis der Dauer von zwei Stunden mit einer Niederschlagshöhe von 20 Millimetern ( $n \approx 0,5$ ) die größte Übereinstimmung mit den Richtwerten (siehe Tabelle A-4). Je stärker das betrachtete Regenereignis von dem Anpassungsereignis hinsichtlich Niederschlagsdauer und -intensität



abweicht, umso deutlicher wird die Abweichung von den Richtwerten. Hierbei gilt, dass sich die berechneten Abflussbeiwerte bei geringerer Regenintensität oder bei längerer Regendauer verringern und umgekehrt.

### 5.6.1.2 Modellregen

Nachfolgend werden mittlere Abflussbeiwerte und Endabflussbeiwerte für eine Belastung der Untersuchungsflächen durch Modellregenereignisse berechnet. Hierbei werden zwei Einzelmodellregen betrachtet. Zum einen wird ein Modellregen der Dauer einer Stunde bei einer Niederschlagshöhe von 15 Millimetern und einer Häufigkeit von  $n = 1$  angesetzt. Zum zweiten werden die Untersuchungsflächen mit einem zweistündigen Modellregen mit einer Regenhöhe von 25 Millimetern und einer Häufigkeit von  $n = 0,3$  belastet.

Die Modellregen wurden ausgehend von einer Basisregenspende  $r_{15;1} = 120$  l/s-ha entsprechend der Modellregenverteilung nach Euler-Typ 2 für die angegebenen Niederschlagsdauern und Häufigkeiten erstellt. Die zeitliche Verteilung der Regenspenden der beiden Einzelmodellregen ist in Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 dargestellt.

Die beiden betrachteten Modellregen unterscheiden sich gegenüber den Blockregenereignissen gleicher Regendauer und Regenhöhe aus Kapitel 5.6.1.1 nur durch eine variable zeitliche Verteilung der Regenintensitäten. Sowohl die Regendauer, die Regenhöhe als auch die Regenhäufigkeit sind in beiden Fällen identisch. Hierdurch lassen sich Rückschlüsse anstellen, inwieweit die zeitliche Verteilung der Niederschlagsintensitäten Einfluss auf die Größe der Abflussbeiwerte besitzt.

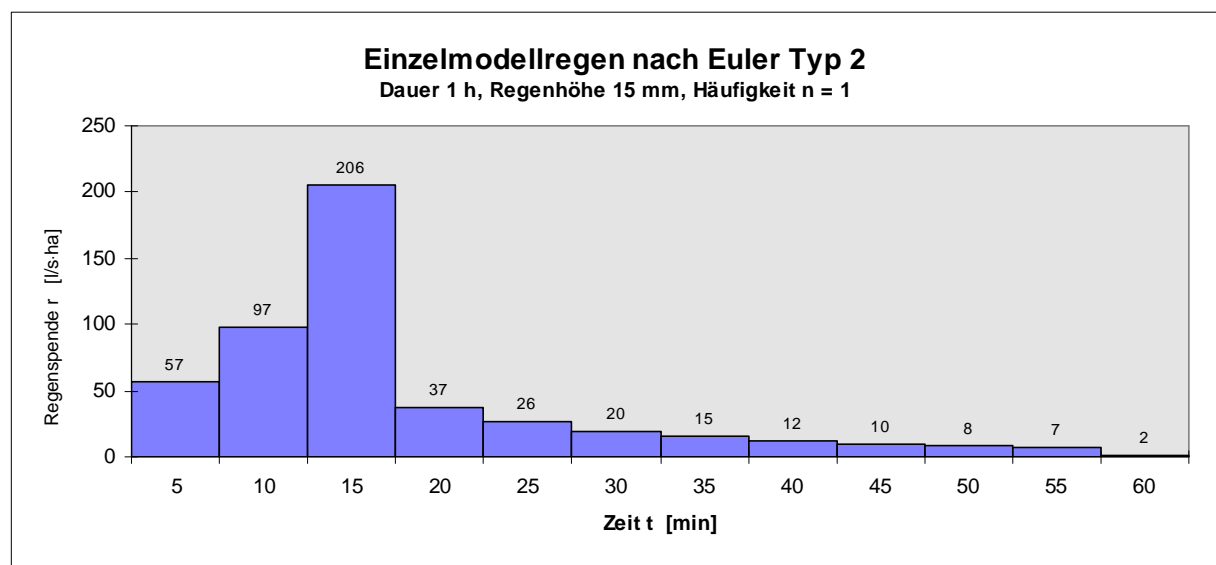


Abbildung 5-2: Einzelmodellregen nach Euler-Typ 2 (Dauer 1 h, Regenhöhe 15 mm)

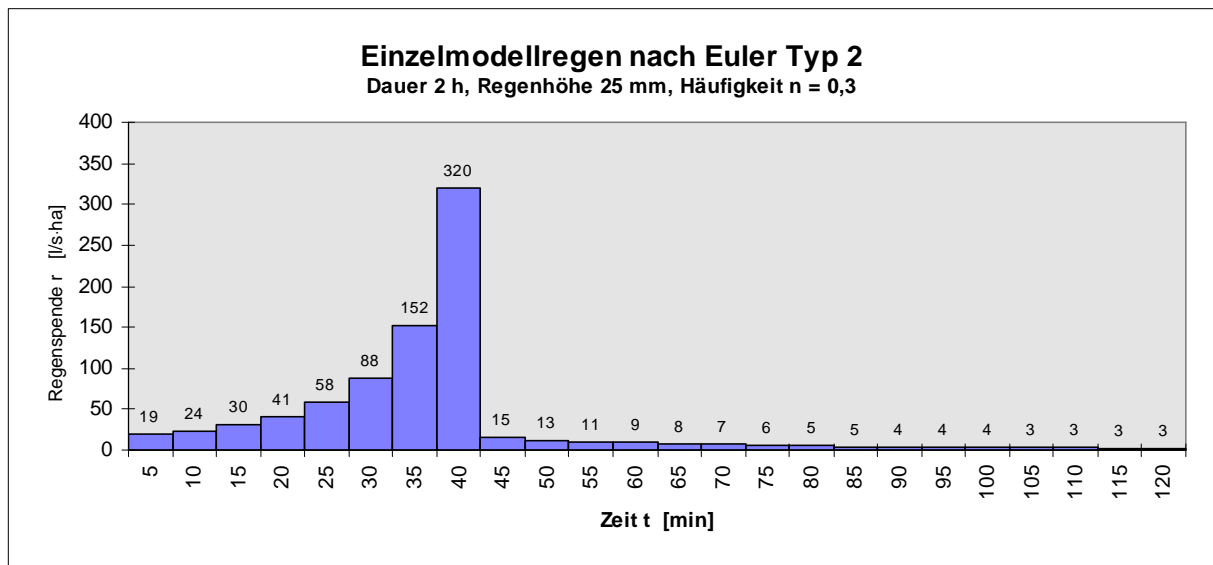


Abbildung 5-3: Einzelmodellregen nach Euler-Typ 2 (Dauer 2 h, Regenhöhe 25 mm)

Die Berechnungsergebnisse aus der Simulation der beiden Modellregenereignisse sind in Tabelle 5-6 aufgeführt. Zum Zweck der Vergleichbarkeit sind die Richtwerte der betrachteten Abflussbeiwerte wieder mit in die Ergebnistabelle aufgenommen. Die einzelnen Berechnungsergebnisse für die beiden Modellregenereignisse sind im Anhang (Tabellen A-7/8) enthalten.

Die Simulationen der Modellregen ergeben lediglich für die undurchlässigen Flächen (Flächentypen Nr. 1-4, Nr. 8 und Nr. 16) eine gute Übereinstimmung der berechneten Abflussbeiwerte  $\psi_m$  und  $\psi_e$  mit deren Richtwerten. Bei den durchlässigen Flächen zeigen sich mit zunehmendem Infiltrationsvermögen der Flächen deutliche Abweichungen von den Orientierungswerten aus Tabelle 5-1. Für das Modellregenereignis der Häufigkeit  $n = 1$  (Dauer 1 h, Regenhöhe 15 mm) liegen die berechneten Abflussbeiwerte um ca. 0,1 über den Richtwerten, für das Modellregenereignis der Häufigkeit  $n = 0,3$  (Dauer 2 h, Regenhöhe 25 mm) sogar um 0,2-0,3. Diese teilweise recht großen Abweichungen sind auf die zeitliche Verteilung des Niederschlags und den dominanten Einfluss der Intensitätsspitze auf die berechneten Größen der Abflussbeiwerte zurückzuführen. In Kapitel 5.4 wurde bereits erläutert, dass während des Niederschlagsmaximums, das bei einem Modellregen nach Euler-Typ 2 einen Großteil der Gesamtniederschlagshöhe einnimmt, das Infiltrationsvermögen deutlich überschritten wird, was rechnerisch zu hohen Abflussbeiwerten  $\psi_m$  und  $\psi_e$  führt. Die mitunter vollständige Versickerung des Niederschlages während der übrigen Regendauer fällt wegen der geringen Niederschlagshöhe kaum ins Gewicht. Die undurchlässigen Flächen, bei denen keinerlei Versickerung auftritt, sind von diesem Effekt nicht betroffen, so dass sich hier die Abflussbeiwerte nahezu unabhängig von der Niederschlagsbelastung darstellen.

Tabelle 5-6: Simulationsergebnisse aus Modellregenspektrum für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert

Minimale und maximale Werte aus Modellregenspektrum						
Nr.	Flächenbefestigung	Verlusthöhe $h_{v,D}$ [mm]	Ergebnis		Richtwerte	
			$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	-	0,99	1,00	> 0,90	1
2	- Ziegel, Dachpappe	-	0,97 - 0,98	1,00	> 0,80	1
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	-	0,99	1,00	> 0,90	1
4	- Dachpappe	-	0,97 - 0,98	1,00	0,9	1
5	- Kies	1,3 - 2,4	0,71 - 0,78	0,90 - 0,91	0,7	0,9
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	3,2 - 4,4	0,49 - 0,64	0,79 - 0,82	0,5	0,8
7	- Aufbau $\geq$ 10 cm	6,1 - 7,3	0,19 - 0,47	0,59 - 0,71	0,3	0,6
8	Asphalt, fugenloser Beton	-	0,87 - 0,92	1,00	0,9	1
9	Pflaster fugendicht	1,3 - 2,6	0,78 - 0,82	0,90 - 0,91	0,75	0,9
10	Pflaster mit Fugen	3,3 - 4,7	0,58 - 0,69	0,78 - 0,81	0,5	0,7
11	Kiesbelag fest	2,3 - 3,7	0,68 - 0,75	0,84 - 0,85	0,6	0,8
12	Kiesbelag locker	4,1 - 5,1	0,46 - 0,64	0,72 - 0,80	0,3	0,6
13	Schotterrasen	4,3 - 5,3	0,44 - 0,63	0,71 - 0,79	0,3	0,6
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	4,2 - 5,6	0,42 - 0,60	0,72 - 0,78	0,25	0,5
15	Rasengittersteine	4,9 - 5,8	0,27 - 0,53	0,67 - 0,77	0,15	0,4
16	befestigte Flächen (pauschal)	-	0,84 - 0,90	1,00	0,95	1
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	7,1 - 9,1	0,12 - 0,40	0,53 - 0,64	0,2	0,3

Im Vergleich mit den Ergebnissen aus der Simulation der Blockregenerereignisse gleicher Regendauer und Regenhöhe aus Kapitel 5.6.1.1 weisen die berechneten Abflussbeiwerte bei den durchlässigen Flächen entsprechend höhere Werte auf (Abweichung für  $\psi_m$  bzw.  $\psi_e$  im Bereich von 0,20 bzw. 0,10-0,15), wobei für Befestigungen mit großer Infiltrationskapazität sogar Differenzen von bis zu 0,4 auftreten. Die Abflussbeiwerte der versickerungslosen Flächen sind dagegen erwartungsgemäß in beiden Belastungsfällen annähernd gleich. Der Vergleich mit den Ergebnissen aus der Blockregensimulation belegt, dass die zeitliche Verteilung des Niederschlages bei den durchlässig befestigten Flächen einen deutlichen Einfluss auf die Größe der berechneten Abflussbeiwerte hat, der mit zunehmendem Versickerungsvermögen der Flächen wächst.

Durch die Anpassung der Versickerungsparameter an ein Blockregenerereignis, also einen Regen konstanter Intensität, waren demnach bei den durchlässigen Flächenbefestigungen die Abweichungen der Berechnungsergebnisse von den Richtwerten zu erwarten. Hier stellt sich die Frage, ob sich einerseits für natürliche Regen, die stets eine variable Intensität aufweisen,

bei entsprechenden Regenhäufigkeiten tatsächlich derart hohe Abflussbeiwerte einstellen oder ob andererseits die gewählten Versickerungsparameter zu gering angesetzt sind und die betrachteten Flächenbefestigungen in Wirklichkeit ein größeres Infiltrationsvermögen besitzen. Diese Frage ist anhand der bisherigen Untersuchungsergebnisse nicht zu beantworten. Zum einen ist eine Überprüfung des tatsächlichen Abflussverhaltens in der Realität anhand der Modellberechnungen aufgrund des Mangels an gesicherten Vergleichsdaten nur in unzureichendem Maße möglich. Darüber hinaus existieren keine ausreichenden Erfahrungswerte zum Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Flächen. Die Anpassung der Modellparameter an ein Blockregenereignis erscheint jedoch aus den genannten Gründen (siehe Kapitel 5.3) nach wie vor sinnvoll.

### 5.6.1.3 Niederschlagsreihe

In diesem Untersuchungsschritt wird die Berechnung der Abflussbeiwerte für eine Niederschlagsreihe vollzogen.

Anwendung findet hierbei eine neunmonatige Regenreihe der TH Darmstadt, die als repräsentative Niederschlagsreihe für Schmutzfrachtberechnungen unter Ausklammerung der Wintermonate Dezember bis Februar aufgestellt wurde /Schmitt/. Die Gesamtniederschlagshöhe der Reihe beträgt 657 mm, was einer in Deutschland für mittlere Verhältnisse üblichen Jahresniederschlagshöhe von 800 mm entspricht.

Die Langzeitsimulation soll zeigen, inwieweit die Richtwerte des mittleren Abflussbeiwertes und des Endabflussbeiwertes bei Ansatz einer Niederschlagsreihe durch die Berechnungsergebnisse bestätigt werden können. Da die Niederschlagsreihe zahlreiche Ereignisse geringerer Intensität beinhaltet, können bei den durchlässig befestigten Flächentypen entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 5.4 Konflikte mit der Definition des Endabflussbeiwertes auftreten.

Mit der zugrunde gelegten Niederschlagsreihe resultieren aus der Langzeitsimulation die in Tabelle 5-7 angegebenen Ergebniswerte.

Während die Ergebniswerte der versickerungslosen Befestigungstypen die Richtwerte weitestgehend erreichen, liegen die berechneten Abflussbeiwerte der durchlässigen Untersuchungsflächen deutlich darunter. Für den mittleren Abflussbeiwert ergeben sich starke Abweichungen von bis zu 0,4 und auch für den Endabflussbeiwert zeigen sich deutliche Abweichungen von bis zu 0,25.

Dagegen treten bei den Flächentypen Nr. 7, Nr. 15 und Nr. 17 (Intensiv begrüntes Dach, Rasengittersteine, pauschal unbefestigte Flächen) ausgesprochen hohe Endabflussbeiwerte auf. Diese Befestigungsarten besitzen sehr hohe Anfangsverluste, so dass hier die unter Kapitel 5.4 angesprochene Problematik der Definition des Endabflussbeiwertes zum Tragen kommt. Bedingt durch die hohen Benetzungs- und Muldenverluste, die einen Großteil der Niederschlagshöhe einnehmen, treten bei schwächeren Regen rechnerisch nur sehr geringe

Versickerungsverluste auf. Die hohen Endabflussbeiwerte bei diesen Flächen resultieren also aus der Definitionsgleichung des Endabflussbeiwertes, die für diesen Fall aufgrund der Abweichungen zwischen dem Abflussverhalten in der Realität und dessen Nachbildung im Modell keine zutreffenden Ergebnisse liefert.

Tabelle 5-7: Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert aus Langzeitsimulation einer neunmonatigen Niederschlagsreihe ( $h_N = 657$  mm entspricht  $h_a = 800$  mm/a)

Neunmonatige Niederschlagsreihe der TH Darmstadt							
Nr.	Flächenbefestigung	Verlusthöhen		Ergebnis		Richtwert	
		$h_{V,B+M}$ [mm]	$h_{V,D}$ [mm]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	38	-	0,94	1,00	0,95	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	63	-	0,90	1,00	0,9	1,00
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	38	-	0,94	1,00	0,95	1,00
4	- Dachpappe	63	-	0,90	1,00	0,9	1,00
5	- Kies	216	217	0,34	0,67	0,7	0,90
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	269	252	0,21	0,62	0,5	0,80
7	- Aufbau $\geq$ 10 cm	313	278	0,10	(0,58)	0,3	0,60
8	Asphalt, fugenloser Beton	171	-	0,74	1,00	0,85	1,00
9	Pflaster fugendicht	171	240	0,37	0,63	0,75	0,90
10	Pflaster mit Fugen	216	319	0,19	0,51	0,5	0,70
11	Kiesbelag fest	195	291	0,26	0,56	0,6	0,80
12	Kiesbelag locker	253	317	0,13	0,52	0,3	0,60
13	Schotterrasen	253	319	0,13	0,51	0,3	0,60
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	269	319	0,10	0,51	0,25	0,50
15	Rasengittersteine	313	299	0,07	(0,54)	0,15	0,40
16	befestigte Flächen (pauschal)	182	-	0,72	1,00	0,95	1,00
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	313	316	0,04	(0,52)	0,2	0,30

Angesichts der sehr niedrigen rechnerischen Werte für den mittleren Abflussbeiwert sowie den Endabflussbeiwert der versickerungswirksamen Befestigungsarten stellt sich analog der Auswertung der Modellregenereignisse in Kapitel 5.6.2 die Frage, ob das Infiltrationsvermögen dieser Flächen in Wirklichkeit geringer ist, als bei der Wahl der Modellparameter angenommen und ob der Abflussbeitrag von diesen Flächen im Jahresmittel tatsächlich derart gering ausfällt. Die angesetzten Modellparameter zur Versickerung sind jedoch im Vergleich zu den in Kapitel 3 vorgestellten Untersuchungsergebnissen ohnehin relativ gering, so dass die Annahme geringerer Versickerungsleistungen nicht sinnvoll erscheint. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Modellanwendung mit den zugrunde gelegten Definitionen der Abflussbeiwerte und den angesetzten Modellparametern keine zutreffende Ergebniswerte für eine Langzeitsimulation liefert. Festzustellen bleibt, dass durch den Ansatz der an das zweistündige

Blockregenereignis mit einer Regenhöhe von 25 Millimetern angepassten Modellparameter zur Versickerung die Richtwerte des mittleren Abflussbeiwertes sowie des Endabflussbeiwertes der durchlässig befestigten Flächen anhand der Modellrechnungen nicht erreicht werden können. Einen Aufschluss über das explizite Abflussverhalten der einzelnen Flächentypen bei unterschiedlichen Niederschlagsbelastungen kann anhand der vorliegenden Modelluntersuchung nicht erfolgen. Es wird deutlich, dass hinsichtlich der Quantifizierung des Abflussbeitrags der durchlässig Flächenarten noch Untersuchungsbedarf besteht.

### 5.6.2 Einheitsflächenuntersuchung des Spitzenabflussbeiwertes

Wie in Kapitel 5.4 bereits beschrieben, ist die Definition des Spitzenabflussbeiwertes als Quotient aus maximaler Abflussspende und maximaler Regenspende nur auf Niederschläge konstanter Intensität sinnvoll anwendbar. Daher beschränkt sich das Spektrum der Niederschlagsbelastungen bei der Untersuchung des Spitzenabflussbeiwertes allein auf Blockregenereignisse.

Die Auswahl der maßgebenden Regenereignisse erfolgt vor dem Hintergrund, dass sich Spitzenabflüsse für Starkniederschlagsereignisse mit kurzer Dauer und hoher Intensität ergeben. Zur Untersuchung der Spitzenabflussbeiwerte werden dementsprechend Regenereignisse mit einer Dauer von 10-20 Minuten betrachtet. Für die Bemessung von Entwässerungsnetzen mittels Fließzeitverfahren werden nach ATV-Arbeitsblatt A 118 „Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen“ je nach Gefährdungs- und Schadenspotential des Gebietes Regenhäufigkeiten von 0,1-1,0 a<sup>-1</sup> maßgebend. Die Simulation der Einheitsflächen wird daher zur Untersuchung der Spitzenabflussbeiwerte für folgende Blockregenereignisse vollzogen:

Tabelle 5-8: Blockregenereignisse zur Berechnung von Spitzenabflussbeiwerten

Regenhäufigkeit	Blockregenspenden		
	$r_{10;n}$	$r_{15;n}$	$r_{20;n}$
n			
[1/a]	[l/s·ha]	[l/s·ha]	[l/s·ha]
1,0	150	120	100
0,5	200	150	130
0,2	270	215	175
0,1	350	270	220

Die Bewertung der Berechnungsergebnisse stellt sich schwierig dar, da die in den maßgebenden technischen Regelwerken angegebenen Spitzenabflussbeiwerte nur bedingt als Referenzwerte für die detaillierte Untersuchung verschiedener Befestigungsarten im Rahmen dieser Arbeit herangezogen werden können.

Das ATV-Arbeitsblatt A 118 gibt die in Tabelle 3-3 aufgeführten Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit vom Anteil der befestigten Fläche, der Geländeneigung und der Regenspende an. Somit lässt sich hier lediglich ein Vergleich mit den Flächentypen der Pauschalbetrachtung, befestigte und unbefestigte Flächen (Typ Nr. 16 und 17), anstellen, denen Befestigungsgrade von 100 % bzw. von 0 % zugeordnet werden können. Für die übrigen Flächentypen wird ein Abschätzen des entsprechenden Befestigungsgrades nicht als sinnvoll erachtet.

Die in DIN 1986/2 angegebenen Spitzenabflussbeiwerte, dargestellt in Tabelle 3-1, sind zwar nach der Art der Befestigung differenziert, die Werte erscheinen jedoch teilweise unangemessen niedrig. So werden insbesondere für die durchlässig befestigten Flächentypen Spitzenabflussbeiwerte empfohlen, die deutlich geringere Werte aufweisen, als die Richtwerte für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert nach Schmitt bzw. nach ATV-Merkblatt M 153 (siehe Tabelle 5-9). Definitionsgemäß muss jedoch der Spitzenabflussbeiwert größer als der mittlere Abflussbeiwert und mindestens so groß wie der Endabflussbeiwert sein, so dass die Spitzenabflussbeiwerte für (teil-)durchlässige Flächen nach DIN 1986/2 nicht als Referenzwerte geeignet erscheinen.

DIN EN 752 unterscheidet dagegen wiederum nur nach wenigen Flächenkategorien. Die angegebenen Abflussbeiwerte sind daher zu pauschal, um sie als Vergleichswerte gegenüber den berechneten Spitzenabflussbeiwerten heranziehen zu können.

Um die Größe der errechneten Spitzenabflussbeiwerte dennoch der Größenordnung nach bewerten zu können, wurden unter Berücksichtigung der genannten Quellen die in nachstehender Tabelle 5-9 zusammengestellten Richtwerte gewählt. Diese Richtwerte sind wissenschaftlich nicht abgesichert und können nur der Orientierung dienen. Aufgrund dieser Unsicherheit werden vielfach lediglich Wertebereiche angegeben.

Tabelle 5-9: Richtwerte des mittleren Abflussbeiwertes, des Endabflussbeiwertes sowie des Spitzenabflussbeiwertes

Nr.	Flächenbefestigung	Richtwerte					
		$\Psi_m$ nach Schmitt/ ATV-M 153	$\Psi_e$ nach Schmitt/ ATV-M 153	$\Psi_s$ nach ATV-A 118	$\Psi_s$ nach DIN 1986	$\Psi_s$ nach DIN EN 752	$\Psi_s$ gewählt
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	> 0,90	1.00	-	1.0	0.9 - 1.0	<b>1.0</b>
2	- Ziegel, Dachpappe	> 0,80	1.00	-	1.0	0.9 - 1.0	<b>1.0</b>
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	> 0,90	1.00	-	1.0	0.5 - 1.0	<b>1.0</b>
4	- Dachpappe	0.90	1.00	-	1.0	0.5 - 1.0	<b>1.0</b>
5	- Kies	0.70	0.90	-	0.5	0.5 - 1.0	<b>0.9 - 1.0</b>
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	0.50	0.80	-	0.5	(0.5 - 1.0)	<b>0.8 - 0.9</b>
7	- Aufbau $\geq$ 10 cm	0.30	0.60	-	0.3	(0.5 - 1.0)	<b>0.6 - 0.7</b>
8	Asphalt, fugenloser Beton	0.90	1.00	-	1.0	(0.9 - 1.0)	<b>1.0</b>
9	Pflaster fugendicht	0.75	0.90	-	(0.7)	(0.9 - 1.0)	<b>0.9 - 1.0</b>
10	Pflaster mit Fugen	0.50	0.70	-	(0.6)	(0.0 - 0.3)	<b>0.7 - 0.9</b>
11	Kiesbelag fest	0.60	0.80	-	(0)	(0.0 - 0.3)	<b>0.8 - 0.9</b>
12	Kiesbelag locker	0.30	0.60	-	(0)	(0.0 - 0.3)	<b>0.6 - 0.8</b>
13	Schotterrasen	0.30	0.60	-	(0)	(0.0 - 0.3)	<b>0.6 - 0.8</b>
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	0.25	0.50	-	(0.6)	(0.0 - 0.3)	<b>0.5 - 0.7</b>
15	Rasengittersteine	0.15	0.40	-	(0)	(0.0 - 0.3)	<b>0.4 - 0.7</b>
16	befestigte Flächen (pauschal)	0.95	1.00	0.94 - 0.97	-	0.9 - 1.0	<b>1.0</b>
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	0.20	0.30	0.0 - 0.3	0	0.0 - 0.3	<b>0.3 - 0.5</b>

Bei Werten in Klammern beziehen sich die Angaben auf Flächentypen, die mit den Untersuchungsflächen nicht völlig übereinstimmen.

Die Ergebnisse der Starkregensimulation sind in Tabelle 5-10 zusammengefasst. Die Spitzenabflussbeiwerte sind hierbei für die jeweiligen Starkregenspektren getrennt nach der Regendauer dargestellt.

Für die weitgehend undurchlässigen Dach- und Wegflächen (Typen Nr. 1-5 und Nr. 8-9) sowie die pauschal betrachteten befestigten Flächen (Nr. 16) liegen die Berechnungsergebnisse im Bereich der Richtwerte. Es ist also zu konstatieren, dass bei diesen Befestigungsarten die Richtwerte für den Spitzenabflussbeiwert, wie bereits für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert, bestätigt werden können. Die gute Übereinstimmung mit den Referenzwerten ist durch das Fehlen eines nennenswerten Versickerungsanteils zu erklären, über den sich bei der Modellrechnung die Abhängigkeit der Abflussbeiwerte von der Niederschlagsbelastung vollzieht.



Tabelle 5-10: Simulationsergebnisse der Spitzenabflussbeiwerte für Starkregenspektrum

Minimale und maximale Werte aus Starkregenereignissen konstanter Intensität					
Nr.	Flächenbefestigung	Spitzenabflussbeiwert $\psi_s$			Richtwert
		$r_{T=10}$ (n = 0.1 - 1.0)	$r_{T=15}$ (n = 0.1 - 1.0)	$r_{T=20}$ (n = 0.1 - 1.0)	
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0.99 - 1.00	1.00	1.00	1.0
2	- Ziegel, Dachpappe	0.99	1.00	1.00	1.0
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0.99 - 1.00	1.00	1.00	1.0
4	- Dachpappe	0.99	1.00	1.00	1.0
5	- Kies	0.91 - 0.95	0.96 - 0.98	0.96 - 0.98	0.9 - 1.0
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	0.70 - 0.88	0.82 - 0.96	0.89 - 0.96	0.8 - 0.9
7	- Aufbau $\geq$ 10 cm	0.19 - 0.75	0.49 - 0.87	0.52 - 0.86	0.6 - 0.7
8	Asphalt, fugenloser Beton	0.95 - 0.97	1.00	1.00	1.0
9	Pflaster fugendicht	0.93 - 0.96	0.96 - 0.98	0.96 - 0.98	0.9 - 1.0
10	Pflaster mit Fugen	0.85 - 0.92	0.90 - 0.95	0.88 - 0.94	0.7 - 0.9
11	Kiesbelag fest	0.89 - 0.94	0.93 - 0.97	0.92 - 0.96	0.8 - 0.9
12	Kiesbelag locker	0.80 - 0.89	0.85 - 0.94	0.83 - 0.92	0.6 - 0.8
13	Schotterrasen	0.79 - 0.88	0.83 - 0.93	0.82 - 0.92	0.6 - 0.8
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	0.78 - 0.87	0.80 - 0.92	0.79 - 0.90	0.5 - 0.7
15	Rasengittersteine	0.40 - 0.81	0.68 - 0.89	0.70 - 0.87	0.4 - 0.7
16	befestigte Flächen (pauschal)	0.95 - 0.97	1.00	1.00	1.0
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	0.01 - 0.64	0.25 - 0.77	0.26 - 0.75	0.3 - 0.5

Die berechneten Werte für die durchlässig befestigten Flächenarten (Typen Nr. 6-7, Nr. 10-15 und Nr. 17) unterliegen dagegen sehr großen Schwankungen, deren Bandbreite ausgeprägter als bei den Berechnungsergebnissen für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert ist. Darüber hinaus überschreiten hier die berechneten Spitzenabflussbeiwerte die Richtwerte recht deutlich. Lediglich für Blockregenereignisse mit einer Dauer von zehn Minuten können die Referenzwerte teilweise eingehalten werden. Bei Niederschlägen von 15-20 Minuten Dauer treten dagegen Abweichungen bis zu 0,3 bei stärker durchlässigen Flächentypen auf. Ursache hierfür sind die extremen Niederschlagsbelastungen, die zwar ähnliche Regenhäufigkeiten wie die Blockregenereignisse aus der Untersuchung des mittleren Abflussbeiwertes und des Endabflussbeiwertes aufweisen, deren Regenintensitäten jedoch um ein Vielfaches höher liegen. Das Infiltrationsvermögen wird während derart hoher Intensitäten deutlich überschritten und der nicht versickerbare Niederschlagsanteil fließt oberflächlich ab. Für die durchlässig befestigten Flächentypen kann daher keine Übereinstimmung mit den Richtwerten festgestellt werden. Um die ausgewiesenen Referenzwerte einzuhalten, wären höhere Versickerungsleistungen anzusetzen. Angesichts der hohen rechnerischen Spitzenabflussbeiwerte drängt sich die Vermutung auf, dass das Versickerungsvermögen der durchlässig befestigten Flächen in Wirklichkeit höher liegen könnte, als bei der Wahl der

Modellparameter zur Versickerung angenommen. Die Versickerungsparameter wurden ausgehend von in der Literatur genannten Wertebereichen für unbefestigte Flächen für ein zweistündiges Blockregenereignis mit einer Niederschlagshöhe von 25 Millimetern an die zu erwartenden Endabflussbeiwerte nach Schmitt angepasst (siehe Kapitel 5.3). Im Vergleich zu den Untersuchungsergebnissen von Borgwardt, beschrieben in Kapitel 3.2, fallen die angesetzten Versickerungsleistungen relativ gering aus. Aus diesem Grund wird eine erneute Anpassung der Modellparameter zur Versickerung vorgenommen, mit dem Ziel, die zur Einhaltung der Richtwerte erforderliche Größe der Versickerungsparameter zu bestimmen und zu diskutieren.

Die neuerliche Anpassung wird für ein 15-minütiges Blockregenereignis mit einer Regenspende von 215 l/s·ha ( $n \approx 0,2$ ) vollzogen. Die Versickerungsparameter werden auf eine möglichst gute Übereinstimmung der rechnerischen Spitzenabflussbeiwerte mit den Richtwerten aus Tabelle 5-9 ausgerichtet. Die Größe der angesetzten Anfangsverluste bleibt unverändert.

Die Ergebnisse der Anpassung sind in nachstehender Tabelle 5-11 aufgeführt. Zum Vergleich sind die resultierenden Infiltrationsparameter den bisherigen Parameterwerten gegenübergestellt.

Um anhand der Modellsimulation für das zugrunde gelegte Regenereignis Spitzenabflussbeiwerte in der Größenordnung der ausgewiesenen Richtwerte zu erzielen, werden um ein Vielfaches höhere Versickerungsleistungen erforderlich, als bei den bisherigen Berechnungen angesetzt wurden. Für die Pflaster- und Kiesbeläge (Flächentypen Nr. 9-12) ergeben sich konstante Versickerungsraten von 20-65 l/s·ha, für die Befestigungsarten Nr. 13-15 und Nr. 17 (Schotterrasen, Pflaster mit Sickeröffnungen und pauschal unbefestigte Flächen) resultieren Anfangsversickerungsraten von 150-190 l/s·ha und Endversickerungsraten von 45-65 l/s·ha. Diese hohen Infiltrationsraten werden von den Untersuchungsergebnissen von Muth und Borgwardt bestätigt. Muth gibt für Normalpflaster versickerbare Regenspenden von 80 l/s·ha, für Pflaster mit Sickeröffnungen von 200-350 l/s·ha und für Rasenkammersteine sogar Regenspenden von 750 l/s·ha an, die vollständig und ohne oberflächigen Abfluss von den einzelnen Flächenbefestigungen aufgenommen werden können. Borgwardt konnte mit seinen Untersuchungen an verschiedenen Pflasterflächen ähnlich hohe Versickerungsleistungen nachweisen (siehe Kapitel 3). Die aus der neuen Anpassung resultierenden Infiltrationswerte liegen noch deutlich unter den von Muth und Borgwardt angegebene Werten. Im Vergleich mit den Versickerungsparametern für unbefestigte Flächen nach Paulsen, der abhängig von der Bodenart Anfangsinfiltrationsraten von 50-300 l/s·ha und Endinfiltrationsraten von 5-27 l/s·ha entsprechend Tabelle 5-2 ausweist, fallen die Versickerungswerte jedoch recht hoch aus. Ob die durchlässig befestigten Flächen tatsächlich dauerhaft in der Lage sind, derart hohe Niederschlagsintensitäten zu versickern, kann anhand dieser Untersuchung nicht geklärt werden. Aufschluss über das explizite Versickerungsvermögen durchlässiger Befestigungen kann nur durch weitere praktische Untersuchungen gewonnen werden.

Tabelle 5-11: Ergebnis der Anpassung der Versickerungsparameter an Spitzenabflussbeiwerte

Nr.	Flächenbefestigung	Anpassung an BR D = 2 h / h <sub>N</sub> = 25 mm			Anpassung an BR D = 15 min / r = 215 l/sha					
		f <sub>0</sub>	f <sub>e</sub>	k	f <sub>0</sub>	f <sub>e</sub>	k	Ergebnis	Zielwert	Richtwert
		[l/s·ha]	[l/s·ha]	[1/min]	[l/s·ha]	[l/s·ha]	[1/min]	ψ <sub>s</sub> [-]	ψ <sub>s</sub> [-]	t ψ <sub>s</sub> [-]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	-	-	-	-	-	-	1,00	1,0	1,0
2	- Ziegel, Dachpappe	-	-	-	-	-	-	1,00	1,0	1,0
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	-	-	-	-	-	-	1,00	1,0	1,0
4	- Dachpappe	-	-	-	-	-	-	1,00	1,0	1,0
5	- Kies	4	4	-	15	15	-	0,93	0,95	0,9 - 1,0
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	50	7	0,20	70	20	0,20	0,88	0,9	0,8 - 0,9
7	- Aufbau ≥ 10 cm	83	11	0,10	115	35	0,10	0,66	0,7	0,6 - 0,7
8	Asphalt, fugenloser Beton	-	-	-	-	-	-	1,00	1,0	1,0
9	Pflaster fugendicht	4	4	-	20	20	-	0,91	0,9	0,9 - 1,0
10	Pflaster mit Fugen	12	12	-	40	40	-	0,81	0,8	0,7 - 0,9
11	Kiesbelag fest	8	8	-	30	30	-	0,86	0,9	0,8 - 0,9
12	Kiesbelag locker	17	17	-	65	65	-	0,70	0,7	0,6 - 0,8
13	Schotterrasen	25	17	0,20	150	45	0,20	0,72	0,7	0,6 - 0,8
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	21	21	-	160	60	0,15	0,60	0,6	0,5 - 0,7
15	Rasengittersteine	35	28	0,15	180	65	0,15	0,51	0,5	0,4 - 0,7
16	befestigte Flächen (pauschal)	-	-	-	-	-	-	1,00	1,0	1,0
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	117	30	0,10	190	65	0,10	0,41	0,4	0,3 - 0,5

Unter der Annahme, dass die neu gewählten Modellparameter zur Versickerung zwar recht hoch, aufgrund der Absicherung durch neuere Untersuchungen jedoch durchaus plausibel sind, wird die Modellanwendung nachfolgend für das betrachtete Blockregenspektrum erneut vollzogen. Die Spitzenabflussbeiwerte, die sich mit den neuen Parameterwerten ergeben, sind in Tabelle 5-12 zusammengestellt. Die Berechnungsergebnisse der einzelnen Niederschlagsbelastungen finden sich im Anhang in den Tabellen A-9 bis A-11.

Die mit den neuerlichen angepassten Modellparametern berechneten Spitzenabflussbeiwerte halten die Richtwerte im wesentlichen ein. Aufgrund der höher angesetzten Versickerungsleistungen unterliegen die Abflussbeiwerte der durchlässig befestigten Flächentypen allerdings nun größeren Schwankungen als zuvor. Insbesondere für die Regenereignisse mit einer Häufigkeit von 1,0 ergeben sich Spitzenabflussbeiwerte, die deutlich unter den Richtwerten liegen. Dies war zu erwarten, da bei diesen Niederschlagsereignissen die Regenintensität die angesetzten Versickerungsintensitäten gar nicht oder in weitaus geringerem Maß übersteigt, als bei

den Regenerereignissen geringerer Häufigkeiten mit entsprechend höheren Intensitäten. Hier zeigt sich erneut die Problematik, dass die Spitzenabflussbeiwerte eine signifikante Abhängigkeit von der zugrunde gelegten Niederschlagsbelastung aufweisen. Daher sollte grundsätzlich eine Ausweisung von Spitzenabflussbeiwerten in Abhängigkeit von der Niederschlagsbelastung erfolgen. Die Angabe von konstanten Abflussbeiwerten, wie sei i.d.R. für mittlere Abflussbeiwerte vorgenommen wird, kann bei den Spitzenabflussbeiwerten zu Ungenauigkeiten bei Bemessungsberechnungen führen, die deutliche Über- oder Unterdimensionierungen von Entwässerungsanlagen nach sich ziehen, durch die Anwendung niederschlagsbezogener Spitzenabflussbeiwerte jedoch weitestgehend vermieden werden können.

Tabelle 5-12: Simulationsergebnisse der Spitzenabflussbeiwerte für Starkregenspektrum mit neu angepassten Modellparametern

Minimale und maximale Werte aus Starkregenerereignissen konstanter Intensität					
Nr.	Flächenbefestigung	Spitzenabflussbeiwert $\psi_s$			
		$r_{T=10}$ (n = 0.1 - 1.0)	$r_{T=15}$ (n = 0.1 - 1.0)	$r_{T=20}$ (n = 0.1 - 1.0)	Richtwert
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0.99	1.00	1.00	1.0
2	- Ziegel, Dachpappe	0.99	1.00	1.00	1.0
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0.99	1.00	1.00	1.0
4	- Dachpappe	0.99	1.00	1.00	1.0
5	- Kies	0.83 - 0.93	0.85 - 0.94	0.85 - 0.93	0.9 - 1.0
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	0.59 - 0.86	0.75 - 0.91	0.75 - 0.90	0.8 - 0.9
7	- Aufbau $\geq$ 10 cm	0.01 - 0.73	0.24 - 0.76	0.24 - 0.74	0.6 - 0.7
8	Asphalt, fugenloser Beton	0.95 - 0.98	1.00	1.00	1.0
9	Pflaster fugendicht	0.82 - 0.92	0.80 - 0.92	0.80 - 0.91	0.9 - 1.0
10	Pflaster mit Fugen	0.67 - 0.86	0.60 - 0.85	0.60 - 0.82	0.7 - 0.9
11	Kiesbelag fest	0.74 - 0.89	0.70 - 0.89	0.70 - 0.86	0.8 - 0.9
12	Kiesbelag locker	0.51 - 0.78	0.35 - 0.76	0.35 - 0.70	0.6 - 0.8
13	Schotterrasen	0.28 - 0.75	0.38 - 0.79	0.38 - 0.77	0.6 - 0.8
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	0.12 - 0.68	0.10 - 0.71	0.10 - 0.67	0.5 - 0.7
15	Rasengittersteine	0.00 - 0.64	0.00 - 0.64	0.00 - 0.62	0.4 - 0.7
16	befestigte Flächen (pauschal)	0.95 - 0.98	1.00	1.00	1.0
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	0.00 - 0.57	0.00 - 0.57	0.00 - 0.54	0.3 - 0.5

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die angesetzten Modellparameter zur Beschreibung der Versickerung streng genommen nur für das der Anpassung zugrunde geleg-

te Niederschlagsereignis gelten. Wäre die Anpassung für ein anderes Regenereignis vorgenommen worden, hätten sich entsprechend geringere oder höhere Parameterwerte ergeben. Je mehr also die betrachtete Niederschlagsbelastung von dem Anpassungsereignis hinsichtlich Dauer, Intensität und zeitlichem Verlauf abweicht, umso weniger zuverlässig werden die Berechnungsergebnisse.

### 5.6.3 Fazit der Einheitsflächenuntersuchung

Im ersten Untersuchungsschritt wurden Einheitsflächen mit einer Größe von jeweils 1000 m<sup>2</sup> betrachtet und die Modellanwendung unter Vorgabe von Verlustparametern zur Abflussbildung für verschiedene Niederschlagsbelastungen vollzogen. Die Parameter zur Beschreibung der Versickerung wurden aus Mangel an gesicherten Erfahrungswerten durch Anpassung an die zu erwartenden Endabflussbeiwerte für ein Blockregenereignis ( $D = 2 \text{ h}$ ,  $h_N = 25 \text{ mm}$ ) gewählt.

Zur Berechnung des mittleren Abflussbeiwertes und des Endabflussbeiwertes wurden verschiedene Block- und Modellregenereignisse mit Häufigkeiten von  $2,5-0,1 \text{ a}^{-1}$ , sowie eine neunmonatige Niederschlagsreihe angesetzt und die Abflussbeiwerte für die einzelnen Belastungszustände errechnet. Bei der Simulation der Einzelereignisse zeigte sich für die weitestgehend undurchlässigen Befestigungstypen für alle betrachteten Niederschlagsbelastungen eine gute Übereinstimmung der berechneten Abflussbeiwerte mit den Richtwerten, während dies bei den durchlässig befestigten Flächen nur bei Ansatz von Blockregenereignissen festzustellen war. Für die betrachteten Modellregen ergaben sich aufgrund der zeitlichen Verteilung der Niederschläge und des dominanten Einflusses der Intensitätsspitze auf die Größe der berechneten Abflussbeiwerte deutlich höhere Werte. Aus der Langzeitsimulation einer neunmonatigen Niederschlagsreihe resultierten sehr geringe Abflussbeiwerte. Die Untersuchungsergebnisse verdeutlichten, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Niederschlagsbelastung und der Größe der rechnerischen Abflussbeiwerte durchlässig befestigter Flächen besteht. Entsprechend kann die Angabe expliziter Zahlenwerte für die jeweiligen Abflussbeiwerte nur bezogen auf eine bestimmte Niederschlagsbelastung erfolgen.

Die Untersuchung der Spitzenabflussbeiwerte wurden für ein Blockregenspektrum mit den für die Bemessung relevanten Häufigkeiten von  $1,0-0,1 \text{ a}^{-1}$  und Niederschlagsdauern von 10-20 Minuten durchgeführt. Wie bei der Untersuchung des mittleren Abflussbeiwertes und des Endabflussbeiwertes konnten die berechneten Spitzenabflussbeiwerte für die undurchlässigen Befestigungsarten die zugehörigen Richtwerte bestätigen. Dagegen ergaben sich für die durchlässig befestigten Flächen deutliche Überschreitungen der Referenzwerte. Aus diesem Grund wurde eine erneute Anpassung der Modellparameter zur Versickerung an ein 15-minütiges Blockregenereignis ( $r = 215 \text{ l/s}\cdot\text{ha}$ ;  $n = 0,2$ ) vorgenommen. Die Anpassung ergab gegenüber den ursprünglich angesetzten Werten um ein Vielfaches höhere Versickerungsleistungen, die zur Einhaltung der Richtwerte erforderlich sind. Diese Versickerungsleistungen liegen jedoch im unteren Bereich der von Borgwardt und Muth in neueren Untersuchungen festgestellten Infiltrationsraten und erscheinen durchaus möglich. Inwieweit die durchlässig befestigten Flächen wirklich in der Lage sind, diese hohen Versickerungsleistungen dauerhaft

zu erbringen, kann jedoch anhand der vorliegenden Untersuchung nicht geklärt werden. Hier sind weitere praktische Untersuchungen anzustreben.

## 5.7 Untersuchung von Einzugsgebieten

In der zweiten Phase der Untersuchung werden nun fiktive Einzugsgebiete betrachtet. Die Modellrechnungen sollen zeigen, ob die empfohlenen Standard-Abflussbeiwerte durch die Simulation ganzer Entwässerungsgebiete bestätigt werden können und inwiefern sich eine konsequente Differenzierung nach unterschiedlichen Flächenbeschaffenheiten auf das Abflussverhalten eines gesamten Einzugsgebietes auswirkt. Die Abflusssimulationen werden hierbei an zwei fiktiven Einzugsgebieten, einem ländlich bis kleinstädtisch strukturierten Wohngebiet und einem innerstädtischen Kerngebiet, für jeweils zwei verschiedene Befestigungsszenarien durchgeführt. Betrachtet wird zum einen eine Verteilung der einzelnen Flächenarten, die realen Verhältnissen entspricht (Szenario 1 "Realität") und an dem das Abflussverhalten in der Praxis vorkommender Entwässerungsgebiete simuliert werden soll. Die Abflussberechnung für Szenario 2 ("Vision") soll zeigen, inwieweit ein verstärkter Einsatz versickerungsfreundlicher Flächenbefestigungen Auswirkungen auf die Größe des Niederschlagabflusses hat. Szenario 2 umfasst daher jeweils eine Flächenverteilung mit einem größtmöglichen Anteil an durchlässig befestigten Flächen. Die Abflussbeiwerte werden jeweils für unterschiedliche Niederschlagsbelastungen errechnet und diskutiert.

### 5.7.1 Niederschlagsbelastungen

Die Größe der Abflussbeiwerte ist wie bereits in Kapitel 5.5 beschrieben von der Stärke der zugrunde gelegten Niederschlagsbelastung abhängig. Des Weiteren sind zur Bestimmung der verschiedenen Abflussbeiwerte, des mittlerer Abflussbeiwertes sowie des Endabflussbeiwertes einerseits und des Spitzenabflussbeiwertes andererseits, jeweils unterschiedliche Belastungszustände relevant. Die Untersuchung der beiden fiktiven Einzugsgebiete wird für die nachstehenden Niederschlagsspektren analog den Berechnungen in Kapitel 5.6 durchgeführt.

Tabelle 5-13: Angesetzte Niederschlagsbelastungen zur Simulation fiktiver Einzugsgebiete

mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert		Spitzenabflussbeiwert	
Blockregen	1 h / 10 mm (n = 2,5 a <sup>-1</sup> )	Blockregen	10 min / 150 l/s-ha (n = 1,0 a <sup>-1</sup> )
	1 h / 15 mm (n = 1,0 a <sup>-1</sup> )		10 min / 200 l/s-ha (n = 0,5 a <sup>-1</sup> )
	1 h / 20 mm (n = 0,5 a <sup>-1</sup> )		10 min / 270 l/s-ha (n = 0,2 a <sup>-1</sup> )
	2 h / 20 mm (n = 0,5 a <sup>-1</sup> )		10 min / 350 l/s-ha (n = 0,1 a <sup>-1</sup> )
	2 h / 25 mm (n = 0,3 a <sup>-1</sup> )		15 min / 120 l/s-ha (n = 1,0 a <sup>-1</sup> )
	2 h / 35 mm (n = 0,1 a <sup>-1</sup> )		15 min / 150 l/s-ha (n = 0,5 a <sup>-1</sup> )
Modellregen	1 h / 15 mm (n = 1,0 a <sup>-1</sup> )	15 min / 215 l/s-ha (n = 0,2 a <sup>-1</sup> )	
	2 h / 25 mm (n = 0,3 a <sup>-1</sup> )	15 min / 270 l/s-ha (n = 0,1 a <sup>-1</sup> )	
Niederschlags- Reihe	neunmonatige, standardisierte Reihe TH Darmstadt	20 min / 100 l/s-ha (n = 1,0 a <sup>-1</sup> )	
		20 min / 130 l/s-ha (n = 0,5 a <sup>-1</sup> )	
		20 min / 175 l/s-ha (n = 0,2 a <sup>-1</sup> )	
		20 min / 220 l/s-ha (n = 0,1 a <sup>-1</sup> )	

### 5.7.2 Modellparameter zur Berechnung des Oberflächenabflusses

Zur Berechnung des mittleren Abflussbeiwertes und des Endabflussbeiwertes werden die Parameterwerte aus Kapitel 5.6 übernommen. Die Modellparameter zur Beschreibung der Versickerung wurden an ein zweistündiges Blockregenereignis ( $h_N = 25$  mm) angepasst und erscheinen für das betrachtete Niederschlagspektrum sinnvoll.

Die Simulation von Einheitsflächen für Starkregenereignisse hat gezeigt, dass die Richtgrößen der Spitzenabflussbeiwerte nur mit höher angesetzten Versickerungsleistungen zu erreichen sind. Die Berechnung der Spitzenabflussbeiwerte erfolgt daher für diese neu angepassten Infiltrationsparameter gemäß Kapitel 5.6.2.

### 5.7.3 Einzugsgebietsgebiet 1 - ländlich bis kleinstädtisch strukturiertes Wohngebiet

Zunächst wird ein ländlich bis kleinstädtisch geprägtes Wohngebiet mit einer Größe von zehn Hektar betrachtet. Die Modelluntersuchung werden für zwei Szenarien durchgeführt. Einerseits wird eine reelle Verteilung der Flächentypen (Szenario 1 "Realität") nach entsprechenden Angaben in der einschlägigen Literatur angenommen. Zum zweiten erfolgen die Berechnungen für ein Szenario mit sehr hohem Anteil versickerungsfähiger Flächen (Szenario 2 "Vision").

Die Nachbildung des Entwässerungsgebietes im Modell erfolgt anhand eines Grobnetzes, bestehend aus 24 Haltungen mit einer Länge von jeweils 100 Metern und einem Gefälle von

einem Prozent. An die Haltungen sind die betrachteten Flächentypen entsprechend den nach Szenario 1 und 2 gewählten Verteilungen angeschlossen. Um den Einfluss der Flächengröße auf den Oberflächenabfluss möglichst gering zu halten, wurde die Größe der Teilflächen auf maximal einen Hektar begrenzt. Befestigungstypen mit größeren Flächenanteilen sind auf mehrere Haltungen verteilt. Eine Schemadarstellung des Entwässerungsnetzes von Einzugsgebiet 1 zeigt Abbildung 5-4.

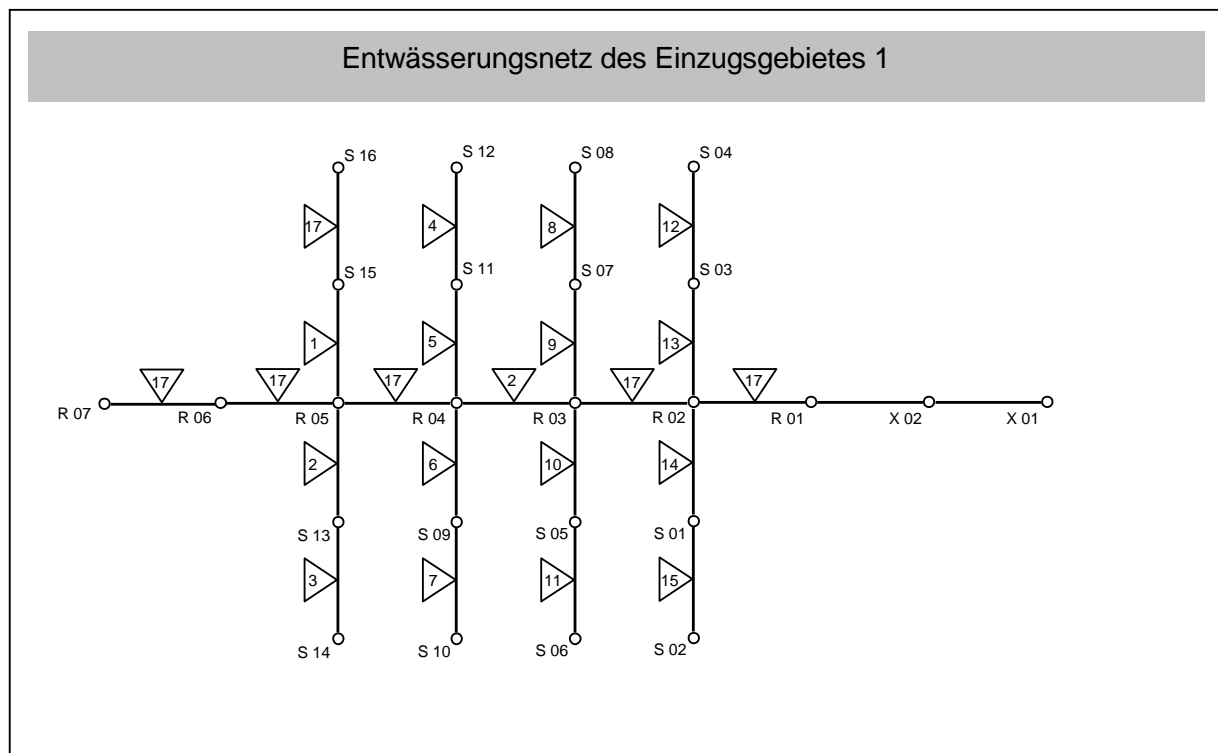


Abbildung 5-4: Schemadarstellung des Entwässerungsnetzes von Einzugsgebiet 1

### 5.7.3.1 Szenario 1 - "Realität"

Mit diesem Szenario sollen Abflussbeiwerte für ein in der Praxis vorkommendes Wohngebiet mit ländlicher bis kleinstädtischer Siedlungsstruktur erarbeitet und diskutiert werden. Bei der Festlegung der prozentualen Verteilung der einzelnen Flächentypen wird auf Angaben in der einschlägigen Literatur zurückgegriffen. In nachstehender Tabelle 5-14 sind die der Festlegung der Flächenverteilung zugrunde gelegten Literaturangaben zusammengestellt /Dittmer, 1999/.



Tabelle 5-14: Literaturangaben über prozentuale Flächenanteile für ländliche und kleinstädtische Wohngebiete und gewählte Flächenverteilung für EZG 1 - Szenario 1

<b>FLÄCHENVERTEILUNGEN FÜR LÄNDLICHE UND KLEINSTÄDTISCHE WOHNGEBIETE</b>			
<b>Berlekamp, Pranzas (offene, niedrige Bebauung; Hamburg)</b>			
Dach	undurchl. vers. Fläche	durchl. vers. Fläche	unversiegelte Fläche
16%	10%	20%	54%
<b>Weinlein (dörfliches/kleinstädtisches Gebiet)</b>			
Dach	Straße	Wege	Grünflächen
20%	12%	5%	63%
<b>Adams (dörfli. Gebiet)</b>			
Dach	Straße	Hof	unvers. Fläche
15%	13%	7%	65%
<b>Mehler (Wohngebiet, Vorstadt)</b>			
Dach	Straße	Hof	unvers. Fläche
26%	25%	5%	44%
<b>Schäfer, Trauth (reines Wohngebiet; Karlsruhe)</b>			
Dach	Straße	Hof	unvers. Fläche
16%	10%	8%	66%
<b>GEWÄHLTE FLÄCHENVERTEILUNG FÜR EZG 1 - SZENARIO 1 ("REALITÄT")</b>			
Dach	undurchl. vers. Fläche	durchl. vers. Fläche	unversiegelte Fläche
20%	10%	10%	60%

Die angegebenen Literaturstellen beziehen sich lediglich auf eine grobe Unterteilung nach der Befestigungskategorie. Angaben mit einer detaillierteren Differenzierung nach Befestigungstypen, ähnlich der im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Unterscheidung der Flächenarten, stehen nicht zur Verfügung. Die explizite Verteilung der in die Untersuchung einbezogenen Flächentypen auf das Einzugsgebiet unter Szenario 1 erfolgt daher nach subjektivem Ermessen. Die gewählte Aufteilung der einzelnen Flächentypen ist in Tabelle 5-15 dargestellt.

Um die Größe der berechneten Abflussbeiwerte bewerten zu können, sind entsprechende Referenzwerte erforderlich. Die Festlegung von allgemeingültigen Abflussbeiwerten für ganze Entwässerungsgebiete stellt sich grundsätzlich als schwierig dar. Jedes Einzugsgebiet hat seine eigenen spezifischen Abflussverhältnisse. Hierbei spielen insbesondere die Geländeneigung, die Verteilung und die Beschaffenheit der Oberflächenbefestigungen sowie die Durchlässigkeit des anstehenden Bodens eine Rolle. Daher stehen kaum verwendbare Erfahrungswerte zur Verfügung. Zahlreiche Literaturstellen befassen sich ausführlich mit dem Versiegelungsgrad verschiedener Siedlungsstrukturen, geben aber keinerlei Auskunft über die Größe der zugehörigen Abflussbeiwerte.

Tabelle 5-15: Gewählte Verteilung der Flächentypen für Einzugsgebiet 1 - Szenario 1

Dachflächen		undurchlässig befestigte Flächen		durchlässig befestigte Flächen		unbefestigte Flächen	
20%		10%		10%		60%	
Schrägdach Metall, Glas, etc. (Typ 1)	1%	Asphalt, fugenloser Beton (Typ 8)	6%	Pflaster mit Fugen (Typ 10)	5%	unbefestigte Flächen (Typ 17)	60%
Schrägdach Ziegel, Dachpappe (Typ 2)	14%	Pflaster fugendicht (Typ 9)	4%	Kiesbelag fest (Typ 11)	0.5%		
Flachdach Metall, Glas, etc. (Typ 3)	1%			Kiesbelag locker (Typ 12)	0.5%		
Flachdach Dachpappe (Typ 4)	1%			Schotterrasen (Typ 13)	0.5%		
Flachdach Kies (Typ 5)	2%			Fugen-Verbundsteine / Sickersteine (Typ 14)	3%		
Gründach Aufbau < 10 cm (Typ 6)	1%			Rasengittersteine (Typ 15)	0.5%		
Gründach Aufbau ≥ 10 cm (Typ 7)	0%						

Die in den maßgebenden technischen Regelwerken aufgeführten Standard-Abflussbeiwerte beziehen sich fast ausschließlich auf einzelne Flächentypen, nicht aber auf ganze Einzugsgebiete. Einzig das ATV-Arbeitsblatt A 118 gibt empfohlene Spitzenabflussbeiwerte in Abhängigkeit vom Befestigungsgrad und der Geländeneigung des Entwässerungsgebietes an. Für das vorliegende Einzugsgebiet mit einem befestigten Flächenanteil von 40 Prozent weist die Richtlinie bei einer zugrunde gelegten Regenspense  $r_{T=15}$  von 215 l/s-ha entsprechend dem Anpassungsereignis zur Festlegung der Infiltrationsparameter einen Spitzenabflussbeiwert von 0,63 aus. Aus Mangel an sonstigen zuverlässigen Vergleichswerten wird aus den typenbezogenen Richtwerten der Abflussbeiwerte jeweils ein flächengewichteter Mittelwert bestimmt und als Richtgröße für die Untersuchung des Einzugsgebietes herangezogen. Bei dieser Verfahrensweise bleibt die Fließzeit im Kanal und somit die zeitversetzte Überlagerung der Abflusswellen der Teilflächen unberücksichtigt. Mit zunehmender Gebietsgröße fallen die ermittelten Richtgrößen dementsprechend zu hoch aus. Für kleinere Entwässerungsnetze können jedoch recht zuverlässige Orientierungswerte erzielt werden, so dass die Verwendung der flächengewichteten Mittelwerte zur Bewertung der betrachteten Einzugsgebiete mit einer Flächenausdehnung von je zehn Hektar unter den gegebenen Umständen als sinnvoll erachtet wird. Die Toleranz dieser Richtwerte muss jedoch höher eingestuft werden als bei den Richtwerten der Einzelflächen aus Kapitel 5.6.

Die Berechnung der flächengewichteten Mittelwerte ist in Tabelle 5-16 dargestellt. Der gewichtete Mittelwert für den Spitzenabflussbeiwert zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem empfohlenen Wert nach ATV-Arbeitsblatt A 118. Es wird davon ausgegangen, dass die Mit-

telwerte für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert in ähnlicher Weise zutreffen.

Tabelle 5-16: Flächengewichtete Mittelwerte  $\psi_{m, EZG 1}$ ,  $\psi_{e, EZG 1}$  und  $\psi_{s, EZG 1}$  für Einzugsgebiet 1

Richtgrößen der Abflussbeiwerte für Einzugsgebiet 1 (flächengewichtetes Mittel)								
Nr.	Flächenbefestigung	Fläche $A_i$	Richtwert		Richtwert		Richtwert	
			$\psi_m$	$\psi_m \cdot A_i$	$\psi_e$	$\psi_e \cdot A_i$	$\psi_s$	$\psi_s \cdot A_i$
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0.10	1.00	0.10	1.00	0.10	1.00	0.10
2	- Ziegel, Dachpappe	1.40	1.00	1.40	1.00	1.40	1.00	1.40
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0.10	1.00	0.10	1.00	0.10	1.00	0.10
4	- Dachpappe	0.10	1.00	0.10	1.00	0.10	1.00	0.10
5	- Kies	0.20	0.70	0.14	0.90	0.18	0.95	0.19
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	0.10	0.50	0.05	0.80	0.08	0.85	0.09
7	- Aufbau $\geq$ 10 cm	0.00	0.30	0.00	0.60	0.00	0.65	0.00
8	Asphalt, fugenloser Beton	0.60	0.90	0.54	1.00	0.60	1.00	0.60
9	Pflaster fugendicht	0.40	0.75	0.30	0.90	0.36	0.90	0.36
10	Pflaster mit Fugen	0.50	0.50	0.25	0.70	0.35	0.80	0.40
11	Kiesbelag fest	0.05	0.60	0.03	0.80	0.04	0.85	0.04
12	Kiesbelag locker	0.05	0.30	0.02	0.60	0.03	0.70	0.04
13	Schotterrasen	0.05	0.30	0.02	0.60	0.03	0.70	0.04
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	0.30	0.25	0.08	0.50	0.15	0.60	0.18
15	Rasengittersteine	0.05	0.15	0.01	0.40	0.02	0.50	0.03
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	6.00	0.20	1.20	0.30	1.80	0.40	2.40
<b>Gesamtgebiet</b>		<b>10.00</b>	<b><math>\psi_{m, EZG} = 0.43</math></b>		<b><math>\psi_{e, EZG} = 0.53</math></b>		<b><math>\psi_{s, EZG} = 0.61</math></b>	

Die Ergebnisse der Modellrechnungen für Szenario 1 des Wohngebietes sind in Tabelle 5-17 und Tabelle 5-18 dargestellt. Die einzelnen Berechnungsschritte je angesetzter Niederschlagsbelastungen sind exemplarisch für zwei Ereignisse im Anhang dargestellt (Tabelle A-12/13).

Analog der Einheitsflächenuntersuchung unterliegen die errechneten Abflussbeiwerte relativ großen Schwankungen, die auf die Abhängigkeit der Abflussbeiwerte von der Niederschlagsbelastung zurückzuführen sind. Gegenüber der Einzelbetrachtung fällt die Schwankungsbreite jedoch geringer aus. Dies erklärt sich dadurch, dass sich die Abhängigkeit der Abflussbeiwerte über die Verlustkomponente der Versickerung vollzieht. Bei der Betrachtung ganzer Einzugsgebiete gestaltet sich dieser Effekt mit steigendem Anteil an undurchlässigen Flächen weniger ausgeprägt.

Unter Berücksichtigung dieses Zusammenhangs kann eine recht gute Übereinstimmung der errechneten mittleren Abflussbeiwerte mit dem abgeschätzten Orientierungswert von ca. 0,4 festgestellt werden. Lediglich bei der Langzeitsimulation der neunmonatigen Niederschlagsreihe ergibt sich, wie auch schon bei der Einzelflächensimulation, ein deutlich niedrigerer Abflussbeiwert  $\psi_m$ . Es zeigt sich also, dass mit dem gewählten Parametersatz lediglich für Einzelregenereignisse Abflussbeiwerte in der Größenordnung der Richtwerte erzielt werden können.

Tabelle 5-17: Simulationsergebnisse für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert für das ländlich strukturierte Einzugsgebiet 1 - Szenario 1 ("Realität")

Berechnete Abflussbeiwerte $\psi_m$ und $\psi_e$ für Einzugsgebiet 1 / Szenario 1				
Niederschlagsbelastung			Abflussbeiwerte	
Regentyp	Regenstärke	Häufigkeit	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]
Blockregen	1 h / 10 mm	2.5 a <sup>-1</sup>	0.28	(n. def.)
	1 h / 15 mm	1.0 a <sup>-1</sup>	0.32	0.60
	1 h / 20 mm	0.5 a <sup>-1</sup>	0.40	0.62
	2 h / 20 mm	0.5 a <sup>-1</sup>	0.31	(n. def.)
	2 h / 25 mm	0.3 a <sup>-1</sup>	0.35	0.52
	2 h / 35 mm	0.1 a <sup>-1</sup>	0.47	0.59
Modellregen	1 h / 15 mm	1.0 a <sup>-1</sup>	0.39	0.68
	2 h / 25 mm	0.3 a <sup>-1</sup>	0.51	0.68
Niederschlagsreihe		-	0.26	0.64

Für den Endabflussbeiwert ergeben die Berechnungen teilweise zu hohe Werte. Dies hat verschiedene Ursachen. Während bei den simulierten Modellregenereignissen die Intensitätsspitze zu einem großen oberflächlich abfließenden Niederschlagsanteil führt, kommt bei der Langzeitsimulation die in den Kapiteln 5.4 und 5.6.1.3 beschriebene Definitionsproblematik bei schwächeren Niederschlägen zum Tragen. Für die Blockregenereignisse, die in der Größenordnung des zur Anpassung der Versickerungsparameter herangezogenen Ereignisses ( $D = 2$  h;  $h_N = 25$  mm) liegen, bestätigen die errechneten Endabflussbeiwerte den Richtwert.

Die Simulationsergebnisse für die Spitzenabflussbeiwerte liegen teilweise deutlich unter dem Referenzwert. Für die Regenereignisse höherer Häufigkeiten sind die Abweichungen durch die signifikante Abhängigkeit der errechneten Spitzenabflussbeiwerte von der Niederschlagsbelastung zu erklären. Bei diesen Belastungszuständen ist die Regenintensität wesentlich geringer als bei dem Basisereignis zur Anpassung der Versickerungsparameter mit einer fünfzehnminütigen Regenspende von 215 l/s-ha. Dementsprechend resultieren hier sehr niedrige Spitzenabflussbeiwerte. Auffällig ist jedoch, dass selbst für Blockregen sehr hoher

Intensitäten die berechneten Werte noch unter dem Richtwert liegen. Dies liegt darin begründet, dass durch die Überlagerung der Teilgebietsabflüsse der zeitliche Verlauf des Gesamtabflusses des Entwässerungsgebietes "gestreckt" wird und sich im Verhältnis zu den Einzelflächen ein geringerer Spitzenabfluss einstellt. Dieser Sachverhalt wird bei der Verwendung des flächengewichteten Abflussbeiwertes als Richtgröße nicht berücksichtigt, so dass es plausibel erscheint, dass sich bei einer Gebietsgröße von zehn Hektar derartig niedrige Spitzenabflussbeiwerte einstellen. Im Vergleich zu dem in ATV-Arbeitsblatt empfohlenen Werten liegen die berechneten Spitzenabflussbeiwerte ebenfalls niedriger. Dies ist dadurch zu erklären, dass die ATV-Richtlinie die Flächeneigenschaften lediglich pauschal über den Befestigungsgrad berücksichtigt, den Grad der Durchlässigkeit der unterschiedlichen Flächenarten jedoch nicht explizit würdigt. Die Abweichungen der rechnerischen Spitzenabflussbeiwerte von den Richtwerten resultieren also in erster Linie nicht aus der grundsätzlichen Anwendung eines Abflussmodells sondern vielmehr aus der detaillierten Differenzierung der Befestigungsarten mit ihren spezifischen Abflusscharakteristika.

Tabelle 5-18: Simulationsergebnisse für den Spitzenabflussbeiwert für Einzugsgebiet 1 - Szenario 1 ("Realität")

Berechnete Spitzenabflussbeiwerte $\psi_s$ für Einzugsgebiet 1 / Szenario 1					
Niederschlagsbelastung			Gebietsabfluss max Q [l/s]	Abflussspende max q [l/s·ha]	Spitzenabflussbeiwert $\psi_s$ [-]
Regendauer [min]	Regenspende [l/s·ha]	Häufigkeit [1/a]			
10	150	1	337.0	34	0.22
	200	0.5	602.4	60	0.30
	270	0.2	1085.3	109	0.40
	350	0.1	1656.5	166	0.47
15	120	1	360.6	36	0.30
	150	0.5	498.0	50	0.33
	215	0.2	1083.6	108	0.50
	270	0.1	1629.5	163	0.60
20	100	1	310.2	31	0.31
	130	0.5	445.4	45	0.34
	175	0.2	877.0	88	0.50
	220	0.1	1340.7	134	0.61

Es ist zu konstatieren, dass sich durch diese weitreichende Flächenunterscheidung und unter Ansatz der teilweise recht hohen Versickerungsleistungen entsprechend Kapitel 5.6.2 geringere Spitzenabflussbeiwerte ergeben, als die einschlägigen Richtlinien ausweisen, da bei der vorliegenden Untersuchung ein deutlicher Abflussrückhalt von den durchlässig befestigten Flächen angerechnet wird. Inwiefern die errechneten Abflusswerte tatsächlich zutreffen, kann

im Rahmen dieser Untersuchung nicht zweifelsfrei beurteilt werden. Es deutet sich jedoch an, dass der Rückhalt des Niederschlages auf den durchlässigen Befestigungsmaterialien größer sein könnte, als bisher in der Planungspraxis angenommen wird.

Es sei darauf hingewiesen, dass der Spitzenabflussbeiwert niedrigere Werte als der Endabflussbeiwert aufweist, dies aber aufgrund der unterschiedlichen Parametersätze zur Beschreibung der Versickerung zu erwarten war und entsprechend nicht weiter von Bedeutung ist.

### 5.7.3.2 Szenario 2 - "Vision"

Die Untersuchung von Szenario 2 soll zeigen, in welchem Umfang sich ein größtmöglicher Einsatz versickerungsfähiger Flächenbefestigungen auf das Abflussverhalten ganzer Einzugsgebiete auswirkt. Gegenüber dem realitätsnahen Szenario 1 wird der undurchlässige Flächenanteil auf ein Minimum reduziert bei gleichzeitiger Erhöhung des Anteils der durchlässig befestigten Flächen auf ein sinnvoll mögliches Maximum. Der Anteil der Dachflächen insgesamt bleibt unverändert, wobei jedoch abflussmindernde Konstruktionen wie intensiv und extensiv begrünte Dächer verstärkt zum Einsatz kommen. Die gewählte Aufteilung der einzelnen Flächentypen ist in nachstehender Tabelle 5-19 dargestellt.

Tabelle 5-19: Angesetzte Verteilung der Flächentypen für Einzugsgebiet 1 - Szenario 2

Flächenaufteilung ländlich strukturiertes Einzugsgebiet - Szenario 2 ("Vision")							
Dachflächen		undurchlässig befestigte Flächen		durchlässig befestigte Flächen		unbefestigte Flächen	
20%		5%		15%		60%	
Schrägdach Metall, Glas, etc. (Typ 2)	0.5%	Asphalt, fugenloser Beton (Typ 9)	4%	Pflaster mit Fugen (Typ 11)	6%	unbefestigte Flächen (Typ 1)	60%
Schrägdach Ziegel, Dachpappe (Typ 3)	10%	Pflaster fugendicht (Typ 10)	1%	Kiesbelag fest (Typ 12)	1%		
Flachdach Metall, Glas, etc. (Typ 4)	0.5%			Kiesbelag locker (Typ 13)	1%		
Flachdach Dachpappe (Typ 5)	1%			Schotterrasen (Typ 14)	1%		
Flachdach Kies (Typ 6)	2%			Fugen-Verbundsteine / Sickersteine (Typ 15)	4%		
Gründach Aufbau < 10 cm (Typ 7)	4%			Rasengittersteine (Typ 16)	2%		
Gründach Aufbau ≥ 10 cm (Typ 8)	2%						

Die Ergebnisse der Simulationen für Szenario 2 sind in Tabelle 5-20 und Tabelle 5-21 aufgeführt und den Ergebnissen für Szenario 1 gegenübergestellt.

Die Modellrechnungen zeigen, dass durch Ausschöpfung des Entsiegelungspotentials in ländlich geprägten Wohngebieten der Oberflächenabfluss nur geringfügig vermindert werden kann. Im Vergleich zu dem realitätsnahen Szenario 1 nimmt der mittlere Abflussbeiwert um ca. 0,05, der Endabflussbeiwert um ca. 0,02 und der Spitzenabflussbeiwert um ca. 0,03 ab. Damit liegen die Abminderungen der Größenordnung nach noch unterhalb der Genauigkeitstoleranzen der einzelnen Werte. Diese geringen Verminderungen der Abflussbeiwerte sind auf den großen Anteil unbefestigter Flächen derartig strukturierter Gebiete zurückzuführen, gegenüber denen eine Reduzierung der undurchlässigen Flächenanteile nur wenig ins Gewicht fällt.

Tabelle 5-20: Simulationsergebnisse für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert für Einzugsgebiet 1

Berechnete Abflussbeiwerte $\psi_m$ und $\psi_e$ für Einzugsgebiet 1						
Niederschlagsbelastung			Szenario 1	Szenario 2	Szenario 1	Szenario 2
Regentyp	Regenstärke	Häufigkeit	$\psi_m$ [-]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]	$\psi_e$ [-]
Blockregen	1 h / 10 mm	2.5 a <sup>-1</sup>	0.28	0.22	(n. def.)	(n. def.)
	1 h / 15 mm	1.0 a <sup>-1</sup>	0.32	0.27	0.60	0.58
	1 h / 20 mm	0.5 a <sup>-1</sup>	0.40	0.36	0.62	0.60
	2 h / 20 mm	0.5 a <sup>-1</sup>	0.31	0.25	(n. def.)	(n. def.)
	2 h / 25 mm	0.3 a <sup>-1</sup>	0.35	0.30	0.52	0.49
	2 h / 35 mm	0.1 a <sup>-1</sup>	0.47	0.44	0.59	0.57
Modellregen	1 h / 15 mm	1.0 a <sup>-1</sup>	0.39	0.35	0.68	0.66
	2 h / 25 mm	0.3 a <sup>-1</sup>	0.51	0.47	0.68	0.65
Niederschlagsreihe		-	0.26	0.21	0.64	0.61

Tabelle 5-21: Simulationsergebnisse für den Spitzenabflussbeiwert für Einzugsgebiet 1

Berechnete Spitzenabflussbeiwerte $\psi_s$ für Einzugsgebiet 1						
Niederschlagsbelastung			Szenario 1	Szenario 2	Szenario 1	Szenario 2
Regendauer [min]	Regenspende [l/s·ha]	Häufigkeit [1/a]	max Q [l/s]	max Q [l/s]	$\psi_s$ [-]	$\psi_s$ [-]
10	150	1	337.0	248.6	0.22	0.17
	200	0.5	602.4	503.5	0.30	0.25
	270	0.2	1085.3	983.7	0.40	0.36
	350	0.1	1656.5	1558.4	0.47	0.45
15	120	1	360.6	285.9	0.30	0.24
	150	0.5	498.0	425.7	0.33	0.28
	215	0.2	1083.6	1023.1	0.50	0.48
	270	0.1	1629.5	1573.5	0.60	0.58
20	100	1	310.2	251.6	0.31	0.25
	130	0.5	445.4	391.4	0.34	0.30
	175	0.2	877.0	826.8	0.50	0.47
	220	0.1	1340.7	1294.8	0.61	0.59

#### 5.7.4 Einzugsgebiet 2 - städtisches Kerngebiet

Im folgenden Untersuchungsschritt wird das Abflussverhalten eines städtischen Kerngebietes mit einer Flächenausdehnung von zehn Hektar betrachtet. Hierbei werden die Modellrechnungen analog Kapitel 5.7.3 wiederum für ein realitätsnahes Befestigungsszenario (Szenario 1 "Realität") sowie ein Szenario maximaler Entsiegelung (Szenario 2 "Vision") durchgeführt. Die Simulationen werden anhand des in Abbildung 5-5 dargestellten Grobnetzes vollzogen. Dieses Kanalnetz unterscheidet sich gegenüber dem Grobnetz aus Kapitel 5.7.3 lediglich durch eine veränderte Flächenverteilung entsprechend der städtebaulichen Struktur des Gebietes.



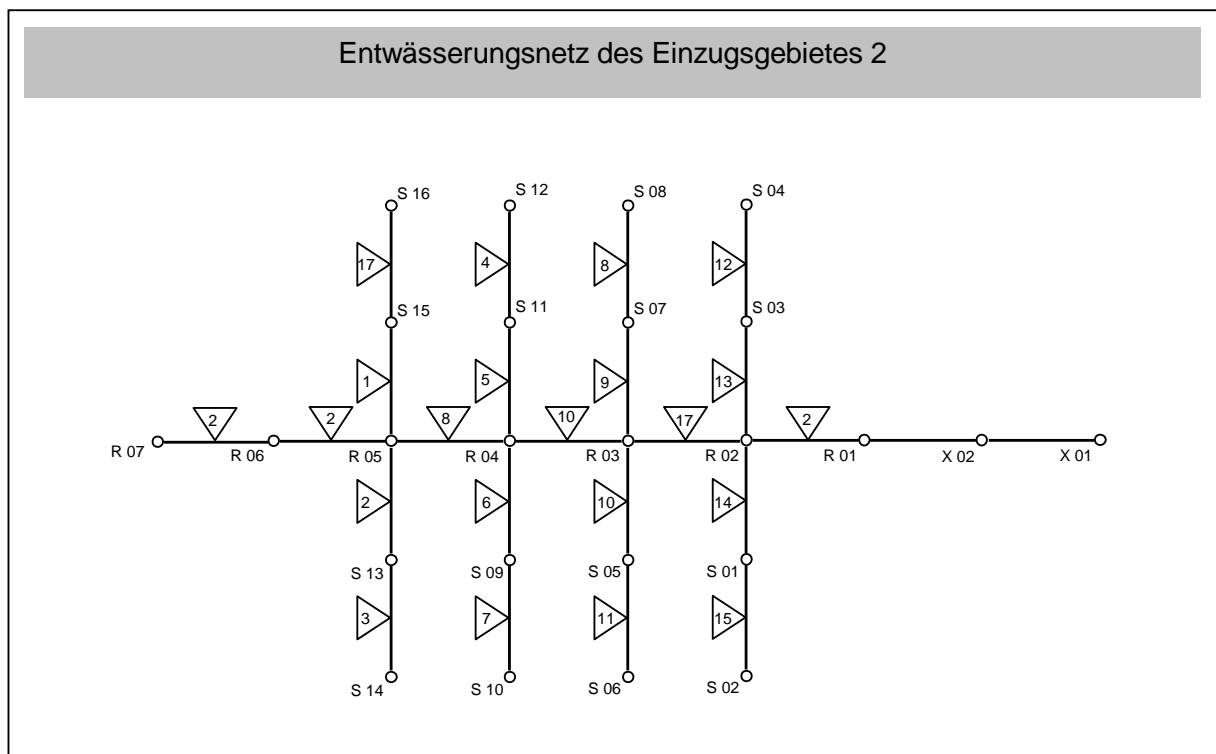


Abbildung 5-5: Schemadarstellung des Entwässerungsnetzes von Einzugsgebiet 2

#### 5.7.4.1 Szenario 1 - "Realität"

Die Anteile der verschiedenen Flächenbefestigungen dieses fiktiven Einzugsgebietes sollen realen Verhältnissen möglichst nahe kommen. Basierend auf verschiedenen Literaturangaben wird die in Tabelle 5-22 aufgeführte Verteilung der einzelnen Befestigungskategorien gewählt. Aus Mangel an detaillierteren Angaben erfolgt die Festlegung der prozentualen Verteilung der einzelnen Flächentypen erneut nach subjektiver Einschätzung.

Zur Beurteilung der errechneten Abflussbeiwerte werden erneut flächengewichtete Mittelwerte bestimmt und als Richtgrößen für das städtische Kerngebiet herangezogen. Die Berechnung der Mittelwerte ist in

Tabelle 5-23 zusammengestellt. Für den mittleren Abflussbeiwert ergibt sich ein Orientierungswert von 0,72, für den Endabflussbeiwert von 0,82 und für den Spitzenabflussbeiwert von 0,86. Für den vorliegenden Befestigungsgrad von 85 Prozent empfiehlt das ATV-Arbeitsblatt A 118 für eine 15-minütige Regenspende  $r_{T=15}$  von 215 l/s·ha einen Spitzenabflussbeiwert von 0,89, der somit eine gute Übereinstimmung mit dem flächengewichteten Mittelwert zeigt.

Die berechneten Abflussbeiwerte für Szenario 1 des innerstädtischen Entwässerungsgebietes sind in Tabelle 5-24 zusammengestellt.

Tabelle 5-22: Literaturangaben über prozentuale Flächenanteile für städtische Kerngebiete /Dittmer, 1999/ und gewählte Flächenverteilung für EZG 2 - Szenario 1

FLÄCHENANTEILE INNERSTÄDTISCHE KERNGEBIETE							
<b>Berlekamp, Pranzas (gem. Nutzung städtischer Prägung, Blockbebauung, Neubauten)</b>							
Dach		undurchl. vers. Fläche		durchl. vers. Fläche		unversiegelte Fläche	
39%		25%		25%		11%	
<b>Berlekamp, Pranzas (gem. Nutzung städtischer Prägung, Blockbebauung, Gründerzeit)</b>							
Dach		undurchl. vers. Fläche		durchl. vers. Fläche		unversiegelte Fläche	
42%		21%		24%		13%	
<b>Weinlein (städtisches Gebiet)</b>							
Dach		Straße		Wege		Grünflächen	
50%		20%		1%		29%	
<b>Mehler (innerstädt. Kerngebiet)</b>							
Dach		Straße		Hof		unvers. Fläche	
38%		35%		5%		22%	
<b>Schäfer, Trauth (Kerngebiet; Karlsruhe)</b>							
Dach		Straße		Hof		unvers. Fläche	
41%		23%		11%		25%	
<b>GEWÄHLTE FLÄCHENAUFTEILUNG FÜR EINZUGSGEBIET 2 - SZENARIO 1 ("REALITÄT")</b>							
<b>Dachflächen</b>		<b>undurchlässig befestigte Flächen</b>		<b>durchlässig befestigte Flächen</b>		<b>unbefestigte Flächen</b>	
<b>40%</b>		<b>30%</b>		<b>15%</b>		<b>15%</b>	
Schrägdach Metall, Glas, etc. (Typ 1)	2%	Asphalt, fugenloser Beton (Typ 8)	20%	Pflaster mit Fugen (Typ 10)	10%	unbefestigte Flächen (Typ 17)	15%
Schrägdach Ziegel, Dachpappe (Typ 2)	28%	Pflaster fugendicht (Typ 9)	10%	Kiesbelag fest (Typ 11)	0.5%		
Flachdach Metall, Glas, etc. (Typ 3)	2%			Kiesbelag locker (Typ 12)	0.5%		
Flachdach Dachpappe (Typ 4)	1%			Schotterrasen (Typ 13)	0.5%		
Flachdach Kies (Typ 5)	5%			Fugen-Verbundsteine / Sickersteine (Typ 14)	3%		
Gründach Aufbau < 10 cm (Typ 6)	2%			Rasengittersteine (Typ 15)	0.5%		
Gründach Aufbau ≥ 10 cm (Typ 7)	0%						

Tabelle 5-23: Flächengewichtete Mittelwerte  $\psi_m$ ,  $\psi_e$  und  $\psi_s$  für Einzugsgebiet 2

Richtgrößen der Abflussbeiwerte für Einzugsgebiet 2 (flächengewichtetes Mittel)									
Nr.	Flächenbefestigung	Fläche $A_i$	Richtwert		Richtwert		Richtwert		
			$\psi_m$	$\psi_m \cdot A_i$	$\psi_e$	$\psi_e \cdot A_i$	$\psi_s$	$\psi_s \cdot A_i$	
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0.20	1.00	0.20	1.00	0.20	1.00	0.20	
2	- Ziegel, Dachpappe	2.80	1.00	2.80	1.00	2.80	1.00	2.80	
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0.20	1.00	0.20	1.00	0.20	1.00	0.20	
4	- Dachpappe	0.10	1.00	0.10	1.00	0.10	1.00	0.10	
5	- Kies	0.50	0.70	0.35	0.90	0.45	0.95	0.48	
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	0.20	0.50	0.10	0.80	0.16	0.85	0.17	
7	- Aufbau $\geq$ 10 cm	0.00	0.30	0.00	0.60	0.00	0.65	0.00	
8	Asphalt, fugenloser Beton	2.00	0.90	1.80	1.00	2.00	1.00	2.00	
9	Pflaster fugendicht	1.00	0.75	0.75	0.90	0.90	0.90	0.90	
10	Pflaster mit Fugen	1.00	0.50	0.50	0.70	0.70	0.80	0.80	
11	Kiesbelag fest	0.05	0.60	0.03	0.80	0.04	0.85	0.04	
12	Kiesbelag locker	0.05	0.30	0.02	0.60	0.03	0.70	0.04	
13	Schotterrasen	0.05	0.30	0.02	0.60	0.03	0.70	0.04	
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	0.30	0.25	0.08	0.50	0.15	0.60	0.18	
15	Rasengittersteine	0.05	0.15	0.01	0.40	0.02	0.50	0.03	
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	1.50	0.20	0.30	0.30	0.45	0.40	0.60	
<b>Gesamtgebiet</b>		<b>10.00</b>	<b><math>\psi_{m,EZG} = 0.72</math></b>		<b><math>\psi_{e,EZG} = 0.82</math></b>		<b><math>\psi_{s,EZG} = 0.86</math></b>		

Tabelle 5-24: Simulationsergebnisse für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert für innerstädtisches Einzugsgebiet 2 - Szenario 1 ("Realität")

Berechnete Abflussbeiwerte $\psi_m$ und $\psi_e$ für Einzugsgebiet 2 / Szenario 1				
Niederschlagsbelastung			Abflussbeiwerte	
Regentyp	Regenstärke	Häufigkeit	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]
Blockregen	1 h / 10 mm	2.5 a <sup>-1</sup>	0.63	n. def.
	1 h / 15 mm	1.0 a <sup>-1</sup>	0.69	0.85
	1 h / 20 mm	0.5 a <sup>-1</sup>	0.75	0.87
	2 h / 20 mm	0.5 a <sup>-1</sup>	0.69	n. def.
	2 h / 25 mm	0.3 a <sup>-1</sup>	0.72	0.82
	2 h / 35 mm	0.1 a <sup>-1</sup>	0.78	0.85
Modellregen	1 h / 15 mm	1.0 a <sup>-1</sup>	0.72	0.87
	2 h / 25 mm	0.3 a <sup>-1</sup>	0.77	0.87
Niederschlagsreihe		-	0.54	0.80

Tabelle 5-25: Simulationsergebnisse für den Spitzenabflussbeiwert für innerstädtisches Einzugsgebiet 2 - Szenario 1 ("Realität")

Berechnete Spitzenabflussbeiwerte $\psi_s$ für Einzugsgebiet 2 / Szenario 1					
Niederschlagsbelastung			Gebietsabfluss max Q [l/s]	Abflusspende max q [l/s·ha]	Spitzen- abflussbeiwert $\psi_s$ [-]
Regendauer [min]	Regenspende [l/s·ha]	Häufigkeit [1/a]			
10	150	1	788.8	79	0.53
	200	0.5	1205.8	121	0.60
	270	0.2	1809.8	181	0.67
	350	0.1	2485.1	249	0.71
15	120	1	810.0	81	0.68
	150	0.5	1059.3	106	0.71
	215	0.2	1666.0	167	0.77
	270	0.1	2174.0	217	0.81
20	100	1	695.6	70	0.70
	130	0.5	943.2	94	0.73
	175	0.2	1372.7	137	0.78
	220	0.1	1841.6	184	0.84

Die Ergebniswerte für das städtische Einzugsgebiet zeigen insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Orientierungswerten. Für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert werden bei der Simulation des zur Anpassung der Versickerungsparameter gewählten Ereignisses gar exakt die Richtwerte erzielt. Zudem sind die berechneten Abflussbeiwerte aufgrund des geringen Anteils versickerungsfähiger Flächen erwartungsgemäß nur relativ geringen Schwankungen unterlegen. Lediglich die Ergebniswerte der Langzeitsimulation weisen wie zuvor deutlichere Abweichungen von den Referenzwerten auf.

Die berechneten Spitzenabflussbeiwerte liegen wie schon bei der Betrachtung des ländlich bis kleinstädtisch strukturierten Wohngebietes unter den geschätzten Richtwerten. Auch wenn hier die Abweichungen geringer ausfallen als zuvor, haben sie die gleichen Ursachen. Bei der Verwendung des flächengewichteten Mittelwertes einerseits bleibt die Überlagerung der Teilgebietsabflüsse unberücksichtigt, wodurch zu hohe Abflussbeiwerte als Referenzgrößen resultieren. Zum anderen beinhalten die empfohlenen Spitzenabflussbeiwerte nach ATV-Arbeitsblatt A 118 lediglich eine pauschale Differenzierung der Flächenarten, die die teilweise hohen Versickerungsleistungen einzelner Flächenbefestigungen nur in geringerem Umfang berücksichtigen. Die Simulation des Starkniederschlagsspektrums für das innerstädtische Einzugsgebiet bestätigen die Schlussfolgerungen aus der Betrachtung des ländlichen Wohngebietes, dass sich durch eine starke Flächendifferenzierung unter Vorgabe wissenschaftlich abgesicherter, aber dennoch recht hoher Versickerungsleistungen gegenüber der technischen Richtlinie niedrigerer Spitzenabflussbeiwerte ergeben, deren wirkliches Zutreffen im Rahmen dieser Untersuchung nicht eindeutig beurteilt werden kann.

### 5.7.4.2 Szenario 2- "Vision"

Für das innerstädtische Kerngebiet wird wiederum ein Befestigungsszenario maximal möglicher Entsiegelung angenommen und hinsichtlich der Auswirkungen auf das Abflussverhalten des Gesamtgebietes untersucht. Das innerstädtische Einzugsgebiet weist im Vergleich zu dem ländlich geprägten Wohngebiet aus Kapitel 5.7.3 ein höheres Entsiegelungspotential auf. Gegenüber dem realen Szenario 1 wird der Anteil der undurchlässig befestigten Flächen (ohne die Dachflächen) halbiert und der Anteil der durchlässig befestigten sowie der unbefestigten Flächen entsprechend erhöht. Der Dachflächenanteil insgesamt bleibt unverändert, die Einzelanteile der unterschiedlichen Dachtypen werden jedoch zugunsten ökologischer Konstruktionen verlagert. Die gewählte prozentuale Verteilung der jeweiligen Flächentypen für das Befestigungsszenario 2 des städtischen Kerngebietes ist in Tabelle 5-26 wiedergegeben.

Tabelle 5-26: Angesetzte Verteilung der Flächentypen für Einzugsgebiet 2 - Szenario 2

Flächenaufteilung städtisches Kerngebiet - Szenario 2 ("Vision")							
Dachflächen		undurchlässig befestigte Flächen		durchlässig befestigte Flächen		unbefestigte Flächen	
40%		15%		25%		20%	
Schrägdach Metall, Glas, etc. (Typ 2)	2%	Asphalt, fugenloser Beton (Typ 9)	10%	Pflaster mit Fugen (Typ 11)	10%	unbefestigte Flächen (Typ 1)	20%
Schrägdach Ziegel, Dachpappe (Typ 3)	28%	Pflaster fugendicht (Typ 10)	5%	Kiesbelag fest (Typ 12)	1%		
Flachdach Metall, Glas, etc. (Typ 4)	1%			Kiesbelag locker (Typ 13)	1%		
Flachdach Dachpappe (Typ 5)	0%			Schotterrasen (Typ 14)	1%		
Flachdach Kies (Typ 6)	1%			Fugen-Verbundsteine / Sickersteine (Typ 15)	10%		
Gründach Aufbau < 10 cm (Typ 7)	6%			Rasengittersteine (Typ 16)	2%		
Gründach Aufbau ≥ 10 cm (Typ 8)	2%						

Die berechneten Abflussbeiwerte für Szenario 2 sind in Tabelle 5-27 und Tabelle 5-28 den Ergebniswerten für Szenario 1 gegenübergestellt. Aus der Umsetzung weitreichender Entsiegelungsmaßnahmen resultieren für das starkversiegelte Kerngebiet deutlich niedrigere Werte für den mittleren Abflussbeiwert, den Endabflussbeiwert und den Spitzenabflussbeiwert. Die Abflussbeiwerte nehmen um die Größenordnung von ca. 0,10 ab, was einer Reduzierung des Abflussvolumens um etwa 15 Prozent entspricht. Diese Zahlenwerte verdeutlichen, dass durch den konsequenten Einsatz wasserdurchlässiger Flächenbefestigungen in Gebieten mit gro-

ßem Entsiegelungspotential ein nennenswerter ökologischer Nutzen erzielt werden kann. Durch die verstärkte Versickerung des Niederschlages unmittelbar auf der Oberfläche kann die Beeinträchtigung des natürlichen Wasserkreislaufes vermindert, können entwässerungstechnische Anlagen kleiner dimensioniert und die Einleitung urbanen Abwassers in die Gewässer reduziert werden, so dass hier neben dem Aspekt des Umweltschutzes auch ein erhebliches finanzielles Einsparpotential besteht.

Tabelle 5-27: Simulationsergebnisse für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert für Einzugsgebiet 2

Berechnete Abflussbeiwerte $\psi_m$ und $\psi_e$ für Einzugsgebiet 2						
Niederschlagsbelastung			Szenario 1	Szenario 2	Szenario 1	Szenario 2
Regentyp	Regenstärke	Häufigkeit	$\psi_m$ [-]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]	$\psi_e$ [-]
Blockregen	1 h / 10 mm	2.5 a <sup>-1</sup>	0.63	0.50	n. def.	(n. def.)
	1 h / 15 mm	1.0 a <sup>-1</sup>	0.69	0.58	0.85	0.78
	1 h / 20 mm	0.5 a <sup>-1</sup>	0.75	0.65	0.87	0.80
	2 h / 20 mm	0.5 a <sup>-1</sup>	0.69	0.55	n. def.	(n. def.)
	2 h / 25 mm	0.3 a <sup>-1</sup>	0.72	0.60	0.82	0.72
	2 h / 35 mm	0.1 a <sup>-1</sup>	0.78	0.69	0.85	0.78
Modellregen	1 h / 15 mm	1.0 a <sup>-1</sup>	0.72	0.61	0.87	0.81
	2 h / 25 mm	0.3 a <sup>-1</sup>	0.77	0.68	0.87	0.80
Niederschlagsreihe		-	0.54	0.44	0.80	0.73

Tabelle 5-28: Simulationsergebnisse für den Spitzenabflussbeiwert für Einzugsgebiet 2

Berechnete Spitzenabflussbeiwerte $\psi_s$ für Einzugsgebiet 2						
Niederschlagsbelastung			Szenario 1	Szenario 2	Szenario 1	Szenario 2
Regendauer [min]	Regenspende [l/s·ha]	Häufigkeit [1/a]	max Q [l/s]	max Q [l/s]	$\psi_s$ [-]	$\psi_s$ [-]
10	150	1	788.8	613.2	0.53	0.41
	200	0.5	1205.8	998.1	0.60	0.50
	270	0.2	1809.8	1581.1	0.67	0.59
	350	0.1	2485.1	2255.9	0.71	0.64
15	120	1	810	634	0.68	0.53
	150	0.5	1059.3	873.0	0.71	0.58
	215	0.2	1666	1492	0.77	0.69
	270	0.1	2174	2013	0.81	0.75
20	100	1	695.6	545.5	0.70	0.55
	130	0.5	943.2	786.2	0.73	0.60
	175	0.2	1372.7	1219.7	0.78	0.70
	220	0.1	1841.6	1669.4	0.84	0.76

### 5.7.5 Fazit der Untersuchung ganzer Einzugsgebiete

Im zweiten Schritt der Untersuchung wurde das Abflussverhalten ganzer Einzugsgebiete betrachtet. Die Modellsimulationen wurden hierbei zum einen für ein ländlich bis kleinstädtisch strukturiertes Wohngebiet und zum anderen für ein städtisches Kerngebiet für verschiedene Befestigungsszenarien vollzogen. Für beide Einzugsgebiete wurden die Berechnungen jeweils für ein realitätsnahes Szenario mit einer Verteilung der einzelnen Flächenarten basierend auf Angaben in der einschlägigen Literatur sowie für ein Szenario maximaler Entsiegelung durchgeführt. Als Niederschlagsbelastungen wurden analog den Modellsimulationen der Einheitsflächen für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert verschiedene Block- und Modellregenereignisse mit Häufigkeiten von 2,5-0,1 1/a sowie eine neunmonatige Niederschlagsreihe angesetzt. Der Untersuchung der Spitzenabflussbeiwerte wurde für ein Blockregenspektrum mit Häufigkeiten von 1,0-0,1 1/a durchgeführt.

Die Berechnungsergebnisse beider Einzugsgebiete verdeutlichten erneut die signifikante Abhängigkeit der Abflussbeiwerte von der zugrunde gelegten Niederschlagsbelastung, die mit zunehmender Versickerungsfähigkeit der Flächen ansteigt. Dementsprechend weisen die Abflussbeiwerte für das ländliche Wohngebiet mit einem hohen Anteil unbefestigter Flächen größerer Schwankungen in den errechneten Werten auf als der stark versiegelte Stadtkern.

Die aus den Simulationsrechnungen gewonnenen Werte für den mittleren Abflussbeiwert zeigten unter Berücksichtigung des oben genannten Abhängigkeitsverhältnisses eine gute Übereinstimmung mit den geschätzten Richtwerten insbesondere für das innerstädtische Einzugsgebiet. Lediglich die Ergebnisse der Langzeitsimulationen lieferten zu geringe Abflussbeiwerte, so dass festgestellt werden muss, dass die Orientierungswerte mit den angesetzten Infiltrationsparametern nur für die Simulation von Einzelereignissen bestätigt werden können.

Die Problematik, dass aus der Langzeitsimulation teilweise unzutreffende Werte resultieren, zeigte sich an den berechneten Endabflussbeiwerten. Bei Niederschlägen geringer Intensität, die innerhalb der betrachteten Regenreihe in großer Anzahl vertreten sind, wird die Versickerungskapazität einzelner Flächen nicht ausgeschöpft. Für derartige Relationen liefert die Definitionsgleichung des Endabflussbeiwertes keine zutreffenden Werte. Die Berechnung von Endabflussbeiwerten durch Niederschlag-Abfluss-Simulation unter Zugrundelegung von Niederschlagsreihen kann daher nicht empfohlen werden. Dagegen zeigten die für Block- und Modellregenereignisse berechneten Endabflussbeiwerte eine gute Übereinstimmung mit den Referenzwerten.

Die berechneten Spitzenabflussbeiwerte aus der Starkregensimulation weisen aufgrund der hoch angesetzten Versickerungsleistungen relativ geringe Werte auf, die um ca. 0,10 unter den Richtwerten liegen. Diese Abweichungen sind insofern plausibel, dass die herangezogenen Referenzwerte aus von der Simulation abweichenden Abflussbedingungen resultieren. Ob die Spitzenabflussbeiwerte tatsächlich derart geringe Werte aufweisen bzw. ob die Versickerungsfähigkeit der durchlässig befestigten Flächen wirklich derart hoch sind, kann anhand der vorliegenden Untersuchung nicht beurteilt werden. Hier zeichnet sich, wie bereits mehrfach erwähnt, weiterer Untersuchungsbedarf ab. Darüber hinaus machen die Ergebnisse deutlich, dass die Ausweisung von Abflussbeiwerten im allgemeinen und von Spitzenabflussbeiwerten im Besonderen nur unter Bezugnahme auf eine bestimmte Niederschlagsbelastung erfolgen kann, da sich die Schwankungsbreite innerhalb der untersuchten Starkregenereignisse sehr ausgeprägt darstellte.

Die Berechnungen für die stark entsiegelten Befestigungsszenarien zeigten, dass durch einen weitreichenden Einsatz versickerungsfähiger Befestigungen eine deutliche Abminderung des Oberflächenabflusses bei Einzugsgebieten mit einem hohen Anteil undurchlässiger Flächen erzielt werden kann. Bei gering befestigten Gebieten dagegen konnte aufgrund des hohen Anteils unbefestigter Flächen und des geringeren Entsiegelungspotentials keine nennenswerte Verringerung der Abflussbeiwerte festgestellt werden.

Mit der Untersuchung ganzer Einzugsgebiete konnten die Ergebnisse der Einheitsflächenbetrachtung weitestgehend bestätigt werden. Durch Vorgabe angepasster Modellparameter zur Beschreibung der Einzelverluste ergeben die Niederschlag-Abfluss-Simulationen Abflussbeiwerte in der Größenordnung der empfohlenen Standardwerte. Der Wahl der Parameterwerte kommt hierbei eine entscheidende Bedeutung zu. Mit den im Rahmen dieser Untersuchung angesetzten Parameterwerten konnten für die Simulation von Einzelregenereignissen zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden, bei den durchgeführten Langzeitsimulationen waren



jedoch deutliche Abweichungen der Abflussbeiwerte von den Richtgrößen zu konstatieren. Dieser Sachverhalt verdeutlicht, dass die Vorgabe der Parameterwerte jeweils anwendungs- und niederschlagsbezogen erfolgen muss. Die Berechnung von mittleren Abflussbeiwerten und von Endabflussbeiwerten erfordert niedrigere Verlustansätze als die Betrachtung von Spitzenabflussbeiwerten, bei der deutlich höhere Versickerungsleistungen anzusetzen sind.

## 6. Betrachtungen zur Genauigkeit der Untersuchungsergebnisse

Die Größe der Abflussbeiwerte wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst. Hier sind u.a. die Niederschlagsbelastung, die Beschaffenheit der Oberfläche, die Geländeneigung, die Vorbefeuchtung der Flächen bei Regenbeginn sowie die klimatischen Verhältnisse zu nennen. Die exakte Berücksichtigung aller Einflussfaktoren bei der Nachbildung der Abflussprozesse im Modell ist jedoch grundsätzlich nicht möglich, so dass die berechneten Abflussbeiwerte gewissen Unsicherheiten unterliegen sind. Mit den nachfolgenden Ausführungen wird versucht, das Maß dieser Ungenauigkeiten qualitativ zu erfassen.

### 6.1 Allgemeine Unsicherheiten bei der Anwendung von Abflussbeiwerten

In der planerischen Praxis wird vielfach auf empfohlene Abflussbeiwerte der einschlägigen technischen Richtlinien zurückgegriffen. Vorausgesetzt wird hierbei, dass die angegebenen Werte einen allgemeingültigen Charakter aufweisen. Aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren auf die Größe der Abflussbeiwerte einerseits und der variierenden Abflussverhältnisse der Entwässerungsgebiete andererseits kann dies jedoch nicht der Fall sein. Bei der Anwendung von Abflussbeiwerten muss daher den gebietsspezifischen Gegebenheiten stets Rechnung getragen werden. Dieser Sachverhalt soll anhand der nachstehenden Ausführungen beispielhaft veranschaulicht werden.

Wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Versickerungsverluste durchlässig befestigter Flächen hat neben dem Infiltrationsvermögen des sickerfähigen Oberbaus die Durchlässigkeit des anstehenden Untergrundes. Für Gebiete mit gering durchlässigen Böden kann die Leistungsfähigkeit der sickerfähigen Befestigungsmaterialien nicht ausgeschöpft werden. Hier wird die geringere Versickerungskapazität des Untergrundes maßgebend, so dass entsprechend höhere Abflussbeiwerte anzunehmen sind.

Von ähnlicher Bedeutung sind die Neigungsverhältnisse des Einzugsgebietes. Entwässerungsflächen mit stärkerem Gefälle weisen geringere Muldenverluste auf. Zudem gelangt nur ein verminderter Teil des Niederschlages zur Versickerung. Entsprechend stellen sich bei derartigen Bedingungen höhere Abflussbeiwerte ein.

Beim Prozess der Abflussbildung ist das momentane Verlustpotential von Bedeutung. Die Größe der Benetzungs- und Muldenverluste wird u.a. von den klimatischen Verhältnissen und insbesondere von der Verdunstungsrate bestimmt. Bei der Festlegung von Abflussbeiwerten sind daher die lokalen Klimaverhältnisse zu berücksichtigen.

Anhand dieser Beispiele zeigt sich, dass zahlreiche örtlichen Faktoren Einfluss auf die Größe des Oberflächenabflusses haben. Bei der Anwendung von Abflussbeiwerten sind daher die jeweiligen gebietsspezifischen Randbedingungen zu berücksichtigen. Darüber hinaus muss sich der Planer über die Unsicherheiten empfohlener Abflussbeiwerte bewusst sein.

Richtwerte mit allgemeingültigem Charakter weisen stets Unsicherheiten auf. Entsprechend machen hier Angaben mit einer Genauigkeit auf zwei Nachkommastellen (z.B.  $\psi_m = 0,68$ ) i.d.R. wenig Sinn.

## 6.2 Unsicherheiten der durchgeführten Niederschlag-Abfluss-Simulationen

Die Niederschlag-Abfluss-Simulationen sowohl für Einheitsflächen als auch für ganze Einzugsgebiete haben gezeigt, dass die Abflussbeiwerte maßgeblich von den vorgegebenen Parameterwerten der Einzelverluste bestimmt werden und eine signifikante Abhängigkeit von der zu Grunde gelegten Niederschlagsbelastung aufweisen. Der Einfluss der Niederschlagsbelastung vollzieht sich vor allem über die Versickerungsverluste, wobei hier die Regenhöhen, die Regendauer sowie der zeitliche Verlauf des Regens eine Rolle spielen (siehe Kapitel 5.5).

Ausgangspunkt der vorstehenden Berechnungen war die Vorgabe der Verlustparameter zur Benetzung, Muldenauffüllung und Versickerung. Zur Festlegung der Parameterwerte konnte teilweise auf Angaben in der einschlägigen Literatur zurückgegriffen werden. Insbesondere die Verlustparameter zur Infiltration mussten jedoch aus Mangel an gesicherten Erfahrungswerten an die zu erwartenden Abflussbeiwerte angepasst werden. Die Anpassungen erfolgten zum einen für ein zweistündiges Blockregenereignis mit einer Niederschlagshöhe von 25 mm (mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert) und zum anderen für ein fünfzehnminütiges Starkregenereignis mit einer konstanten Regenspende von 215 l/s-ha. Anschließend wurden die Simulationsrechnungen mit diesen Parametersätzen für verschiedene Niederschlagsbelastungen durchgeführt und die resultierenden Abflussbeiwerte bestimmt. Die ausgewiesenen Ergebniswerte sind daher unbedingt vor dem Hintergrund zu betrachten, dass die errechneten Abflussbeiwerte mit zunehmender Abweichung der jeweiligen Niederschlagsbelastung von dem zur Anpassung gewählten Regenereignis einer steigenden Unsicherheit unterlegen sind.

Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass bei den Simulationsrechnungen zahlreiche Vereinfachungen vorgenommen werden, die zu Diskrepanzen zwischen den Abflussprozessen in der Realität und deren Nachbildung im Modell führen. An dieser Stelle sei beispielsweise die in Kapitel 5.4 beschriebene Problematik bei der Definition des Endabflussbeiwertes angeführt, die dadurch entsteht, dass im Modell die Versickerungsverluste erst nach Abdeckung der Muldenverluste berücksichtigt werden, in der Natur die Vorgänge jedoch quasi zeitgleich einsetzen.

Bei den durchgeführten Modellsimulationen wurde ein einheitlicher Ansatz zur Erfassung der Abflusskonzentration, also der Umwandlung des flächenhaft verteilten, abflusswirksamen Niederschlages in eine Abflussganglinie, gewählt. Diese Berechnungsansätze berücksichtigen Verzögerungseffekte und Fließvorgänge auf der Oberfläche. In der Realität weisen jedoch die Abflusskonzentrationsprozesse der betrachteten Flächentypen Unterschiede auf.

Während bei undurchlässigen Flächenbefestigungen ein rascher Abfluss von der Oberfläche einsetzt, kann sich bei durchlässig befestigten Flächen eine deutliche Abflussverzögerung einstellen. Abflussmessungen an Gründächern haben gezeigt, dass der typische Abflussverlauf zeitlich gestreckt und zudem in der Amplitude deutlich gedämpft erfolgt /Knoll, 2000/. Hierbei wurde ein Beginn der Niederschlagsabflüsse nach mehr als zwei Stunden festgestellt. Derartige Abflussverhältnisse wurden bei den Simulationen im Rahmen dieser Untersuchung aus Gründen einer einfachen Handhabung nicht berücksichtigt, so dass die berechneten Spitzenabflussbeiwerte eine dahingehende Unsicherheit aufweisen. Insbesondere die Berechnungsergebnisse der Dachbegrünungen (Flächentyp Nr. 6 und Nr. 7) sind hiervon betroffen. Es ist nicht auszuschließen, dass für diese Flächentypen die Ergebniswerte zu hoch ausfallen.

### **6.3 Sensitivitätsanalyse ausgewählter Modellparameter**

In den vorstehenden Kapiteln wurde die Abhängigkeit der berechneten Abflussbeiwerte von den vielfältigen gebietsspezifischen und modelltechnischen Einflussfaktoren und die daraus resultierenden Unsicherheiten der Ergebniswerte erläutert. Nachfolgend wird nun beispielhaft für einzelne Flächentypen eine Sensitivitätsanalyse bezüglich verschiedener Modellparameter durchgeführt. Untersucht wird zum einen, in welchem Maße die Größe der angesetzten Versickerungsparameter Einfluss auf die berechneten Abflussbeiwerte hat. Zum zweiten soll die Abhängigkeit der Abflussbeiwerte von der Neigung der Entwässerungsflächen qualitativ erfasst werden.

#### **6.3.1 Sensitivitätsanalyse der Modellparameter zur Versickerung**

Die Sensitivität der aus den Niederschlag-Abfluss-Simulationen gewonnenen Abflussbeiwerte bezüglich der Parameterwerte zur Versickerung wird anhand folgender Flächentypen untersucht:

- fugendichtes Pflaster (Typ Nr. 9)
- Pflaster mit Fugen (Typ Nr.10)
- Fugen-Verbundsteine / Sickerpflaster (Typ Nr. 14)

Die drei betrachteten Flächentypen weisen sehr unterschiedliche Versickerungsleistungen auf und sind daher zur Erarbeitung aussagekräftiger Ergebnisse besonders geeignet. Die Sensitivitätsanalyse wird für zwei Blockregenereignisse vollzogen. Für den mittleren Abflussbeiwert sowie den Endabflussbeiwert wird ein zweistündiger Niederschlag mit einer Höhe von 25 mm angesetzt. Die Berechnungen für den Spitzenabflussbeiwert erfolgen anhand eines Starkregenereignisse mit einer Regenspense von 215 l/s-ha.

Analog Kapitel 5.3 werden konstante Versickerungsraten angenommen. Der Abnahmekoeffizient sowie der Regenerationskoeffizient bleiben unverändert. Die betrachteten Infiltrationswerte sind zusammen mit den berechneten Abflussbeiwerten in Tabelle 6-1 aufgeführt.

Tabelle 6-1: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Versickerungsparameter

Pflaster fugendicht				
Parameter	$f_0 = f_e$ [l/s·ha]	$\Psi_m$ [-]	$\Psi_e$ [-]	$\Psi_s$ [-]
Ausgangszustand	4	0.81	0.89	0.98
Variation 1	2	0.86	0.94	0.99
Variation 2	8	0.71	0.79	0.96
Variation 3	10	0.65	0.73	0.95
Variation 4	20	0.39	0.47	0.91
Pflaster mit Fugen				
Parameter	$f_0 = f_e$ [l/s·ha]	$\Psi_m$ [-]	$\Psi_e$ [-]	$\Psi_s$ [-]
Ausgangszustand	12	0.57	0.69	0.94
Variation 1	6	0.72	0.84	0.97
Variation 2	20	0.37	0.49	0.91
Variation 3	25	0.25	0.37	0.88
Variation 4	30	0.12	0.24	0.86
Fugen-Verbundsteine, Sickersteine				
Parameter	$f_0 = f_e$ [l/s·ha]	$\Psi_m$ [-]	$\Psi_e$ [-]	$\Psi_s$ [-]
Ausgangszustand	21	0.32	0.50	0.90
Variation 1	10	0.58	0.76	0.95
Variation 2	30	0.11	0.29	0.86
Variation 3	40	0.00	0.18	0.81
Variation 4	50	0.00	0.18	0.77

Die Ergebnisse zeigen, dass eine überaus deutliche Abhängigkeit der rechnerischen Abflussbeiwerte, insbesondere des mittleren Abflussbeiwertes und des Endabflussbeiwertes, von den angesetzten Versickerungsparametern besteht. Bereits geringfügige Variationen des Versickerungsvermögens ziehen erhebliche Veränderungen in den Ergebniswerten nach sich. In Abbildung 6-1 sind die Abhängigkeitsverhältnisse exemplarisch für Pflasterflächen mit Fugen graphisch dargestellt. Es wird deutlich, dass mit abnehmender Versickerungsleistung die rechnerischen Abflussbeiwerte linear ansteigen, wobei die Sensitivität des mittleren Abflussbeiwertes und des Endabflussbeiwertes im Vergleich zum Spitzenabflussbeiwert um ein Vielfaches höher ist.

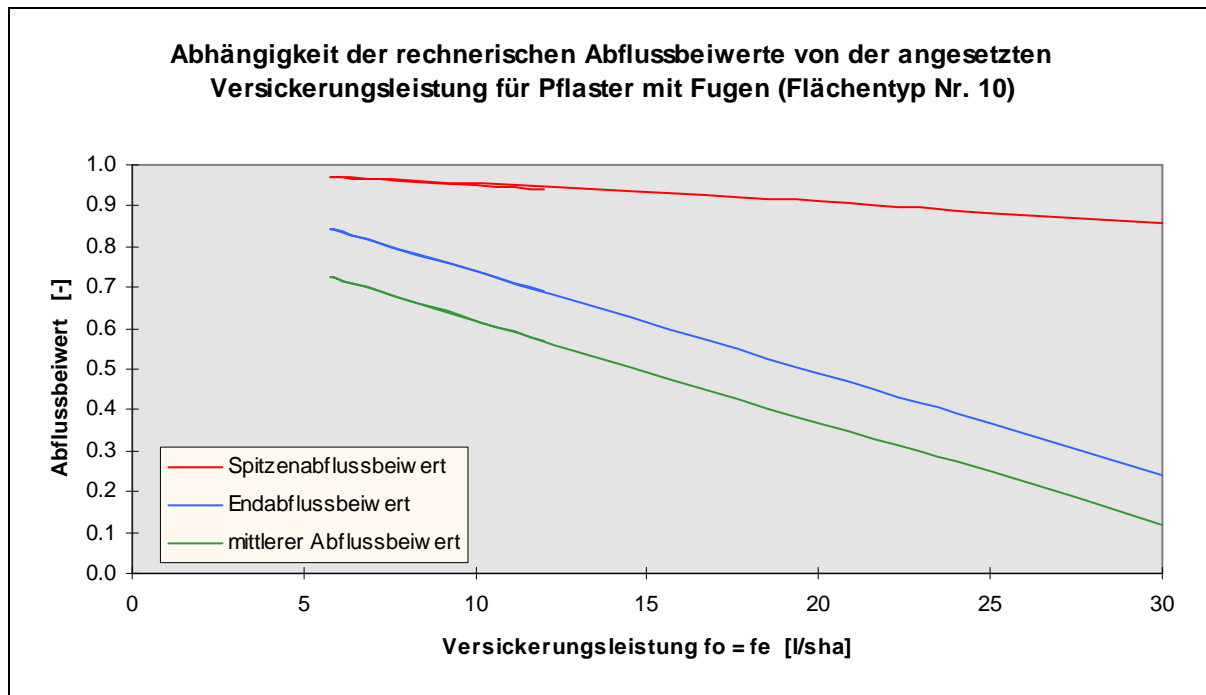


Abbildung 6-1: Abhängigkeit der rechnerischen Abflussbeiwerte vom Versickerungsvermögen für Pflaster mit Fugen

Die starke Sensitivität des mittleren Abflussbeiwertes sowie des Endabflussbeiwertes auf Veränderungen der Infiltrationsparameter vermindert die Zuverlässigkeit der Untersuchungsergebnisse. Die angesetzten Modellparameter zur Versickerung wurden aus Mangel an zuverlässigen Erfahrungswerten durch Anpassung an die zu erwartenden Abflussbeiwerte festgelegt und sind somit nur in begrenztem Umfang wissenschaftlich abgesichert. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse verschärfen diese Problematik zusätzlich, so dass konstatiert werden muss, dass die ausgewiesenen Abflussbeiwerte der Gesamtuntersuchung mit größeren Unsicherheiten behaftet sind.

### 6.3.2 Sensitivitätsanalyse der Geländeneigung

Die in Kapitel 5 erarbeiteten Simulationsergebnisse gelten lediglich für Entwässerungsflächen geringen Gefälles entsprechend der Neigungsklasse 2 nach ATV-Arbeitsblatt A 118. Nachfolgend soll untersucht werden, welchen Einfluss die Geländeneigung auf die Größe der rechnerischen Abflussbeiwerte hat und in welchem Maße die Abflussbeiwerte für unterschiedliche Gefälleverhältnisse variieren.

Problematisch stellt sich hierbei erneut die Festlegung der Verlustparameter dar. In der Literatur finden sich keinerlei explizite Zahlenwerte, inwieweit sich die Einzelverluste mit zunehmendem Gefälle quantitativ ändern. Das Abflussmodell KOSMO berücksichtigt stan-

dardmäßig bei befestigten Flächen folgenden maximalen Muldenverlusthöhen in Abhängigkeit von der Neigungsklasse:  $\max h_{V,M (NG\ 1/2/3/4)} = 2,2 / 2,0 / 1,5 / 1,4$  mm. Hilfsweise werden die angepassten Verlustparameter analog den Verhältnissen der maximalen Muldenverlusthöhen variiert und die Abflussbeiwerte für die ausgewählten Niederschlagsereignisse entsprechend Kapitel 6.3.1 berechnet. Diese vereinfachte Vorgehensweise wird zur qualitativen Erfassung der Sensitivität der rechnerischen Abflussbeiwerte bezüglich der Geländeneigung als hinreichend genau erachtet.

Die Sensitivitätsanalyse wird erneut exemplarisch anhand der drei Flächentypen Nr. 9, Nr. 10 und Nr. 14 durchgeführt. Die rechnerischen Abflussbeiwerte für die einzelnen Neigungsklassen sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst.

Tabelle 6-2: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Geländeneigung

Pflaster fugendicht			
Neigungsklasse	$\Psi_m$ [-]	$\Psi_e$ [-]	$\Psi_s$ [-]
1	0.79	0.88	0.98
2	0.81	0.89	0.98
3	0.85	0.91	0.98
4	0.86	0.92	0.98
Pflaster mit Fugen			
Neigungsklasse	$\Psi_m$ [-]	$\Psi_e$ [-]	$\Psi_s$ [-]
1	0.54	0.67	0.94
2	0.57	0.69	0.94
3	0.67	0.76	0.96
4	0.70	0.78	0.96
Fugen-Verbundsteine / Sickersteine			
Neigungsklasse	$\Psi_m$ [-]	$\Psi_e$ [-]	$\Psi_s$ [-]
1	0.27	0.47	0.89
2	0.32	0.50	0.90
3	0.47	0.61	0.93
4	0.50	0.63	0.93

Die Abflussbeiwerte weisen analog der Abhängigkeit von den Versickerungsparametern eine nennenswerte Sensitivität bezüglich der Geländeneigung der Entwässerungsflächen auf. Hierbei ist erneut für den mittleren Abflussbeiwert und den Endabflussbeiwert eine ausgeprägtere Abhängigkeitsbeziehung als für den Spitzenabflussbeiwert festzustellen. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Ergebniswerte der Neigungsklassen 1 und 2 nur wenig von einander abweichen. Die Differenzen zwischen den Neigungsklassen 3 und 4 sind ähnlich

gering. Mit ausreichender Genauigkeit genügt also eine Differenzierung zwischen Flächen mit geringem Gefälle (NG 1-2) und Flächen mit starkem Gefälle (NG 3-4). Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Sensitivität der rechnerischen Abflussbeiwerte auf die Geländeneigung mit zunehmender Durchlässigkeit der Flächen wächst. Gegenüber den Berechnungsergebnissen für eine geringe Geländeneigung sind für Flächen mit starkem Gefälle je nach Versickerungsvermögen die mittleren Abflussbeiwerte und die Endabflussbeiwerte um 0,05-0,15 zu erhöhen. Die Spitzenabflussbeiwerte steigen nur in sehr geringem Umfang. In Abbildung 6-2 ist die Abhängigkeit der rechnerischen Abflussbeiwerte von der Geländeneigung beispielhaft für Pflaster mit Fugen graphisch dargestellt.

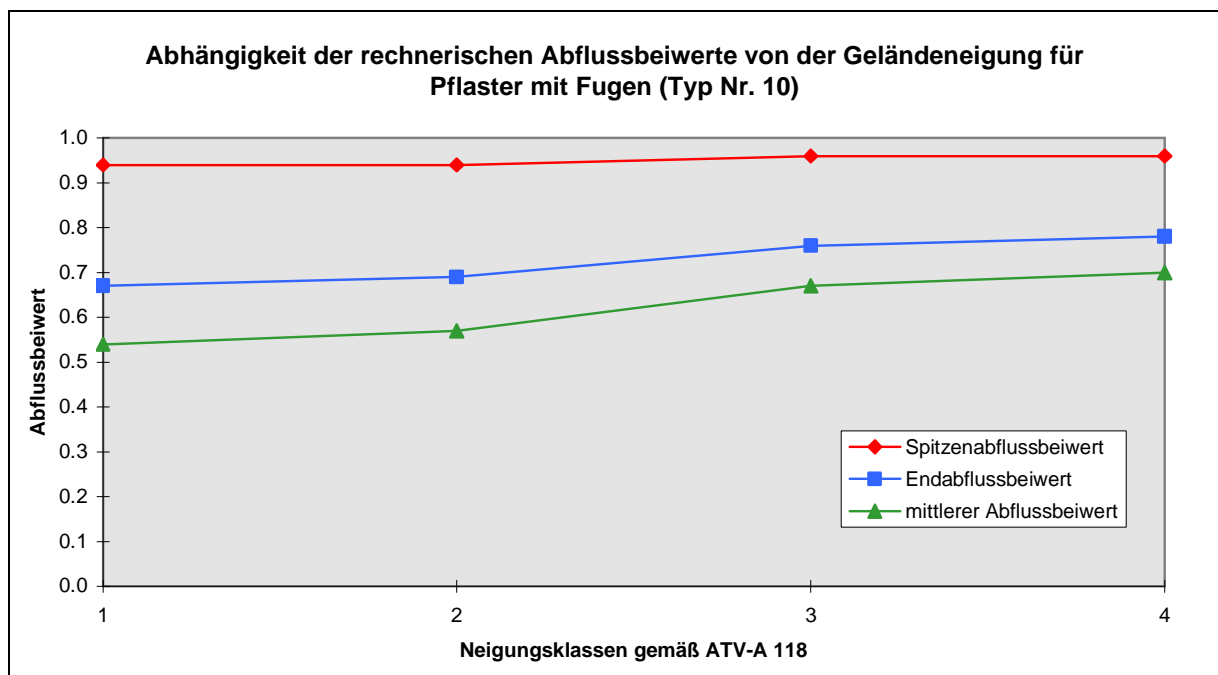


Abbildung 6-2: Abhängigkeit der rechnerischen Abflussbeiwerte von der Geländeneigung für Pflaster mit Fugen



## 7. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Zur Untersuchung des Abflussverhaltens gängiger Befestigungsarten wurden mit Hilfe des Modells KOSMO Niederschlag-Abfluss-Simulationen durchgeführt. Betrachtet wurden hierbei sowohl Einheitsflächen als auch ganze Einzugsgebiete verschiedener städtebaulicher Struktur. Die Berechnungen erfolgten unter Vorgabe empfohlener Verlustparameter zur Benetzung und zur Muldenauffüllung sowie angepasster Parameterwerte zur Beschreibung der Versickerung. Die Abflusssimulationen wurden für ein weitreichendes Spektrum bemessungsrelevanter Niederschlagsbelastungen vollzogen. Es wurden Einzelregen konstanter und variabler Intensität unterschiedlicher Regendauer sowie eine neunmonatige Niederschlagsreihe simuliert. Aus der Bilanzierung des Niederschlag-Abfluss-Prozesses wurden die verschiedenen Abflussbeiwerte der unterschiedlichen Flächenarten ermittelt.

Die Modellsimulationen haben gezeigt, dass eine signifikante Abhängigkeit der rechnerischen Abflussbeiwerte von der zugrunde gelegten Niederschlagsbelastung besteht, die mit zunehmender Versickerungsfähigkeit der Flächen ansteigt. Während die weitestgehend undurchlässigen Flächentypen recht konstante Werte aufweisen, sind die Abflussbeiwerte der durchlässig befestigten Flächen großen niederschlagsbedingten Schwankungen von bis zu 0,5 unterlegen. Hierbei spielen sowohl die Regenintensität als auch die Regendauer und der zeitliche Verlauf des Regens eine Rolle.

Die Berechnungsergebnisse für den mittleren Abflussbeiwert, den Endabflussbeiwert sowie den Spitzenabflussbeiwert zeigen für die Simulation von Einzelereignissen unter Berücksichtigung der belastungsbezogenen Abhängigkeit eine gute Übereinstimmung mit den Richtwerten. Den Berechnungen des mittleren Abflussbeiwertes und des Endabflussbeiwertes sind hierbei wesentlich geringere Parameterwerte zur Versickerung zugrunde gelegt als für den Spitzenabflussbeiwert, für den die Richtwerte nur mit deutlich höher angesetzten Infiltrationsleistungen bestätigt werden können. Diese Versickerungsleistungen liegen zwar noch weit unter den von Borgwardt und Muth in neueren Untersuchungen festgestellten Werten und sind somit wissenschaftlich begründet. Dennoch erscheint fraglich, ob das Versickerungsvermögen durchlässig befestigter Flächen tatsächlich derart hoch ist. Dies kann anhand der vorliegenden Untersuchung nicht geklärt werden. Hier sind weitere praktische Untersuchungen erforderlich.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Langzeitsimulation von Niederschlagsreihen mit den an Einzelereignisse angepassten Modellparametern sehr geringe Ergebniswerte für den mittleren Abflussbeiwert und teilweise auch für den Endabflussbeiwert der durchlässigen Flächenbefestigungen liefert. Hier stellt sich die Frage, ob der Abflussbeitrag von diesen Flächen im Jahresmittel tatsächlich derart gering ausfällt. Dies wäre aufgrund der Abhängigkeit der Abflussbeiwerte von der Regenbelastung durchaus plausibel, da ein Großteil der jährlichen Niederschlagsereignisse nur geringe Intensitäten aufweist. Der Ansatz geringerer Parameterwerte zur Versickerung erscheint im Hinblick auf die in der Literatur genannten Untersuchungsergebnisse nicht sinnvoll. Darüber hinaus trat hinsichtlich der Endabflussbeiwerte die Problematik auf, dass sich aus der Definitionsgleichung für stark durchlässige Flächenbefestigungen unzutreffenden Werte ergeben. Die Langzeitsimulation von Einzugsgebieten mit einem hohen Anteil versickerungsintensiver Flächen muss daher als problematisch beurteilt werden.

Die Berechnungen für Einzugsgebiete haben gezeigt, dass durch die weitreichende Umsetzung von Maßnahmen zur Minimierung der Flächenversiegelung eine nennenswerte Verringerung des Oberflächenabflusses erzielt werden kann. Mit der verstärkten Versickerung des Niederschlages eröffnet sich neben den nachhaltig ökologischen Effekten vor allem auch ein erhebliches finanzielles Einsparpotential.

Betrachtungen zur Genauigkeit der durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass zahlreiche gebiets- und modellspezifische Faktoren Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Berechnungsergebnisse haben. Die rechnerischen Abflussbeiwerte weisen insbesondere hinsichtlich der Parameterwerte im Versickerungsansatz nach Horton eine starke Sensitivität auf, die bei der Anwendung von Abflussmodellen zur Berechnung des Oberflächenabflusses berücksichtigt werden muss.

## 8. Fazit und Empfehlungen

Aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Modellberechnungen kann die Kompatibilität von Berechnungen des Oberflächenabflusses durch Abflusssimulation mit den empfohlenen Standardwerten der einschlägigen Literatur festgestellt werden. Durch die Anwendung gängiger Modellansätze zur Beschreibung der Abflussbildung unter Ansatz angepasster Parameterwerte können insbesondere bei der Simulation von Einzelereignissen weitestgehend übereinstimmende Ergebnisse erzielt werden. Somit kann die Verwendung von Abfluss- und Schmutzfrachtmodellen der Siedlungsentwässerung zur Berechnung und Bewertung des Abflussverhaltens von Entwässerungsflächen grundsätzlich empfohlen werden.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Simulationsergebnisse entscheidend von der angesetzten Niederschlagsbelastung bestimmt werden, so dass die Anwendung von Berechnungsmodellen nur bezogen auf bestimmte Niederschlagsbelastungen erfolgen kann. Darüber hinaus empfiehlt es sich dringendst, das eingesetzte Modell vorab unter Berücksichtigung der gebietsspezifischen Gegebenheiten bezüglich der angesetzten Parameterwerte zu eichen. Die Anwendung von Abfluss- und Schmutzfrachtmodellen setzt daher stets voraus, dass die abflussrelevanten Randbedingungen sorgfältig erfasst und bei der Abflusssimulation ausreichend berücksichtigt werden. Die Anwendung von Abflussmodellen zur Berechnung des Oberflächenabflusses ist insbesondere im Hinblick auf eine differenzierte Betrachtung der Teilflächen und der Berücksichtigung des Versickerungsbeitrages durchlässiger Befestigungsarten sinnvoll, während diesbezüglich die Angaben des ATV-Arbeitsblattes A 118 nicht ausreichend sind.

Des Weiteren machten die Untersuchungen deutlich, dass der derzeitige Kenntnisstand bezüglich des Infiltrationsvermögens durchlässig befestigter Flächen nicht ausreicht. Die vorzugebenden Modellparameter zur Versickerung sind bislang noch mit größeren Unsicherheiten behaftet, die sich unmittelbar auf die Zuverlässigkeit der Berechnungsergebnisse niederschlagen. Hier werden langfristige und großflächig angelegte Freilandmessungen empfohlen, die zur Erarbeitung von Versickerungswerten als Eingangsgrößen in die Abflussberechnungen und zur Festlegung von Abflussbeiwerten dienen können.

## 9. Literaturverzeichnis

### **ATV (1984)**

„Grundsätze für die Berechnung von Entwässerungsnetzen mit elektronischen Datenverarbeitungsanlagen“

ATV-Regelwerk, Merkblatt A 119

St. Augustin

### **ATV (1994)**

„Anforderungen an Niederschlag-Abfluss-Berechnungen in der Stadtentwässerung“

ATV-Regelwerk, Merkblatt M 165

St. Augustin

### **ATV (1999)**

„Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen“

ATV-Regelwerk, Arbeitsblatt A 118

St. Augustin

### **ATV (2000)**

„Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser“

ATV-Regelwerk, Merkblatt M 153

St. Augustin

### **Bischoff, W. (1988)**

Abwassertechnik

Verlag B.G. Teubner, Stuttgart

### **Borgwardt, S. (1994-a)**

Bewertung wassergebundener Befestigungen

Naturschutz und Landschaftsplanung 3/94; S. 98-101

### **Borgwardt, S. (1994-b)**

Der Abflussbeiwert – Kritische Anmerkungen zur DIN 1986 Teil 2

Das Gartenamt 11/94; S. 756-760

### **Borgwardt, S. (1995-a)**

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. (1995-b)**

Untersuchung der Durchlässigkeit von Bodenbelägen in wassergebundener Bauweise

Wasser & Boden 2/95; S. 11-16

**Deutsches Institut für Normung e. V. - DIN (1985)**

DIN 4045

Abwassertechnik - Begriffe

**Deutsches Institut für Normung e. V. - DIN (1995)**

DIN 1986/2

Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke, Teil 2: Ermittlung von Nennweiten von Abwasser- und Lüftungsleitungen

**Deutsches Institut für Normung e. V. - DIN (1996)**

DIN EN 752

Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden

**Dittmer, U. (1999)**Flächenverteilungen für unterschiedliche städtebaulichen Strukturen  
persönliche Literaturrecherche (unveröffentlicht)**Hanses, U. et al (1999)**Wasserdurchlässiges Pflaster auf gering durchlässigem Untergrund  
TIS 4/99; S.61-69**James, W.; James, R. C. (1998)**Users guide to SWMM4 RUNOFF and supporting modules - Hydrology  
Computational Hydraulics International, Guelph, Ontario**Liesecke, H. J. (1998)**Das Retentionsvermögen von Dachbegrünungen  
Stadt und Grün 1/98; S. 46-53**Liesecke, H. J. (1995)**

Extensive Dachbegrünungen - Wasserrückhaltung, Abflussverzögerung und Abflussbeiwerte

Teil1: Bundesbaublatt 44 (9); S. 686-690

Teil2: Bundesbaublatt 44 (11); S. 876-879

**Knoll, S. (2000)**Hydraulische Auswirkungen von Dachbegrünungen auf die Siedlungswasserwirtschaft  
(Teil 1)

gwf Wasser/Abwasser 141 (2000) Nr. 9

**Kolb, W. (1995)**Regenwasserabflüsse bei Grünflächen auf Dächern  
Neue Landschaft 12/95; S. 901-903

**Meißner, E. (2000)**

Anwendung des ATV-DVWK-Merkblattes M 153 „Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser“

Entwässerungskonzepte

ATV-Fortbildungskurs für Wassergütewirtschaft und Abwassertechnik

**Muth, W. (1994-a)**

Regenwasserversickerung von Verkehrsflächen

TIS 5/1994; S. 28-44

**Muth, W. (1994-b)**

Ökologische Flächenbefestigung mit Betonpflaster

ISSUE 5/1994; S. 114-123

**Paulsen, O. (1986)**

Kontinuierliche Simulation von Abflüssen und Stofffrachten in der Trennentwässerung

Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover, Heft 62

**Pecher, R. (1969)**

Der Abflussbeiwert und seine Abhängigkeit von der Regendauer

Berichte aus dem Institut für Wasserwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Band 2

Technische Hochschule München

**Schmitt, T. G. (1991)**

Ingenieurbüro ASAL + Partner

KOSMO - Kontinuierliche Schmutzfrachtmodellierung

Modellbeschreibung

unveröffentlicht

**Schmitt, T. G. (2000)**

Überprüfung der Standard-Abflussbeiwerte durch Anwendung eines Abflussmodells zur Kanalnetz- und schmutzfrachtberechnung

Teil1: Endabflussbeiwerte  $\psi_{A128}$  zur Verwendung nach ATV-A 128 (Stand Mai 2000)

unveröffentlicht

**Scholz, K. (2000)**

Unterlagen zur Modellanwendung KOSIM

unveröffentlicht

**Sieker, F. (1988)**

Sammelwerk Hydrologie der Stadtentwässerung

Abflussbildung (Teil II)

SuG - Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz 4/1988

**Verworn, H.-R. (1993)**

Abflussbildungsansätze für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung  
SuG - Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz 24/1993

**Zimmermann, J.; Engler, W. (1999)**

Siedlungswasserwirtschaft II - Siedlungsentwässerung  
Scriptum der Universität Kaiserslautern  
FG Siedlungswasserwirtschaft  
unveröffentlicht

## A. Anhang

### A.1 Berechnungsergebnisse des mittleren Abflussbeiwertes und des Endabflussbeiwertes aus Einheitsflächenbetrachtung

#### A.1.1 Blockregenspektrum

Tabelle A-1: Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Blockregenereignis der Dauer 1 h und einer Niederschlagshöhe von 10 mm ( $n = 2 \text{ a}^{-1}$ )

Einzelereignis als Blockregen mit $h_N = 10 \text{ mm}$ ; $D = 1 \text{ h}$							
Nr.	Flächenbefestigung	Verlusthöhen		Ergebnis		Richtwerte	
		$h_{v,B+M}$ [mm]	$h_{v,D}$ [mm]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,98	1,00	> 0,90	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	0,4	-	0,96	1,00	> 0,80	1,00
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,98	1,00	> 0,90	1,00
4	- Dachpappe	0,4	-	0,96	1,00	0,90	1,00
5	- Kies	3,0	1,1	0,59	0,89	0,70	0,90
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	4,5	2,6	0,29	0,74	0,50	0,80
7	- Aufbau $\geq 10 \text{ cm}$	6,0	4,0	0,00	(n. def.)	0,30	0,60
8	Asphalt, fugenloser Beton	2,0	-	0,80	1,00	0,90	1,00
9	Pflaster fugendicht	2,0	1,3	0,68	0,84	0,75	0,90
10	Pflaster mit Fugen	3,0	3,2	0,38	0,68	0,50	0,70
11	Kiesbelag fest	2,5	2,1	0,54	0,79	0,60	0,80
12	Kiesbelag locker	4,0	3,7	0,23	0,63	0,30	0,60
13	Schotterrasen	4,0	3,9	0,21	0,61	0,30	0,60
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	4,5	4,3	0,13	0,57	0,25	0,50
15	Rasengittersteine	6,0	4,0	0,00	(n. def.)	0,15	0,40
16	befestigte Flächen (pauschal)	2,2	-	0,78	0,95	0,95	1,00
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	6,0	4,0	0,00	(n. def.)	0,20	0,30



Tabelle A-2: Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Blockregenereignis der Dauer 1 h und einer Niederschlagshöhe von 15 mm ( $n = 1 \text{ a}^{-1}$ )

Einzelereignis als Blockregen mit $h_N = 15 \text{ mm}$ ; $D = 1 \text{ h}$							
Nr.	Flächenbefestigung	Verlusthöhen		Ergebnis		Richtwerte	
		$h_{v,B+M}$ [mm]	$h_{v,D}$ [mm]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	0,4	-	0,97	1,00	> 0,80	1,00
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
4	- Dachpappe	0,4	-	0,97	1,00	0,90	1,00
5	- Kies	3,0	1,3	0,72	0,92	0,70	0,90
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	4,5	3,0	0,50	0,80	0,50	0,80
7	- Aufbau $\geq 10 \text{ cm}$	6,0	6,4	0,18	0,58	0,30	0,60
8	Asphalt, fugenloser Beton	2,0	-	0,87	1,00	0,90	1,00
9	Pflaster fugendicht	2,0	1,4	0,78	0,91	0,75	0,90
10	Pflaster mit Fugen	3,0	3,6	0,56	0,76	0,50	0,70
11	Kiesbelag fest	2,5	2,3	0,68	0,85	0,60	0,80
12	Kiesbelag locker	4,0	4,5	0,43	0,70	0,30	0,60
13	Schotterrasen	4,0	4,8	0,42	0,68	0,30	0,60
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	4,5	5,5	0,33	0,63	0,25	0,50
15	Rasengittersteine	6,0	6,3	0,18	0,58	0,15	0,40
16	befestigte Flächen (pauschal)	2,4	-	0,84	0,98	0,95	1,00
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	6,0	9,0	0,00	0,40	0,20	0,30

Tabelle A-3: Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Blockregenereignis der Dauer 1 h und einer Niederschlagshöhe von 20 mm ( $n = 0,5 \text{ a}^{-1}$ )

Einzelereignis als Blockregen mit $h_N = 20 \text{ mm}$ ; $D = 1 \text{ h}$							
Nr.	Flächenbefestigung	Verlusthöhen		Ergebnis		Richtwerte	
		$h_{v,B+M}$ [mm]	$h_{v,D}$ [mm]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	0,4	-	0,98	1,00	> 0,80	1,00
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
4	- Dachpappe	0,4	-	0,98	1,00	0,90	1,00
5	- Kies	3,0	1,4	0,78	0,93	0,70	0,90
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	4,5	3,2	0,62	0,84	0,50	0,80
7	- Aufbau $\geq 10 \text{ cm}$	6,0	7,0	0,35	0,65	0,30	0,60
8	Asphalt, fugenloser Beton	2,0	-	0,90	1,00	0,90	1,00
9	Pflaster fugendicht	2,0	1,4	0,83	0,93	0,75	0,90
10	Pflaster mit Fugen	3,0	3,9	0,65	0,80	0,50	0,70
11	Kiesbelag fest	2,5	2,5	0,75	0,87	0,60	0,80
12	Kiesbelag locker	4,0	5,0	0,55	0,75	0,30	0,60
13	Schotterrasen	4,0	5,3	0,54	0,74	0,30	0,60
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	4,5	6,1	0,47	0,69	0,25	0,50
15	Rasengittersteine	6,0	7,5	0,33	0,63	0,15	0,40
16	befestigte Flächen (pauschal)	2,4	-	0,88	1,00	0,95	1,00
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	6,0	11,7	0,12	0,42	0,20	0,30

Tabelle A-4: Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Blockregenereignis der Dauer 2 h und einer Niederschlagshöhe von 20 mm ( $n = 0,5 \text{ a}^{-1}$ )

Einzelereignis als Blockregen mit $h_N = 20 \text{ mm}$ ; $D = 2 \text{ h}$							
Nr.	Flächenbefestigung	Verlusthöhen		Ergebnis		Richtwerte	
		$h_{v,B+M}$ [mm]	$h_{v,D}$ [mm]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	0,4	-	0,98	1,00	> 0,80	1,00
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
4	- Dachpappe	0,4	-	0,98	1,00	0,90	1,00
5	- Kies	3,0	2,6	0,72	0,87	0,70	0,90
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	4,5	5,0	0,53	0,75	0,50	0,80
7	- Aufbau $\geq 10 \text{ cm}$	6,0	9,3	0,24	0,54	0,30	0,60
8	Asphalt, fugenloser Beton	2,0	-	0,90	1,00	0,90	1,00
9	Pflaster fugendicht	2,0	2,8	0,76	0,86	0,75	0,90
10	Pflaster mit Fugen	3,0	7,5	0,47	0,62	0,50	0,70
11	Kiesbelag fest	2,5	4,8	0,63	0,76	0,60	0,80
12	Kiesbelag locker	4,0	9,7	0,32	0,52	0,30	0,60
13	Schotterrasen	4,0	9,9	0,31	0,51	0,30	0,60
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	4,5	11,8	0,19	0,41	0,25	0,50
15	Rasengittersteine	6,0	13,9	0,00	0,30	0,15	0,40
16	befestigte Flächen (pauschal)	2,4	-	0,88	1,00	0,95	1,00
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	6,0	14,0	0,00	(n. def.)	0,20	0,30

Tabelle A-5: Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Blockregeneignis der Dauer 2 h und einer Niederschlagshöhe von 25 mm ( $n = 0,25 \text{ a}^{-1}$ )

Einzelereignis als Blockregen mit $h_N = 25 \text{ mm}$ ; $D = 2 \text{ h}$							
Nr.	Flächenbefestigung	Verlusthöhen		Ergebnis		Richtwerte	
		$h_{v,B+M}$ [mm]	$h_{v,D}$ [mm]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	0,4	-	0,98	1,00	> 0,80	1,00
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
4	- Dachpappe	0,4	-	0,98	1,00	0,90	1,00
5	- Kies	3,0	2,8	0,77	0,89	0,70	0,90
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	4,5	5,2	0,61	0,79	0,50	0,80
7	- Aufbau $\geq 10 \text{ cm}$	6,0	10,1	0,36	0,60	0,30	0,60
8	Asphalt, fugenloser Beton	2,0	-	0,92	1,00	0,90	1,00
9	Pflaster fugendicht	2,0	2,8	0,81	0,89	0,75	0,90
10	Pflaster mit Fugen	3,0	7,7	0,57	0,69	0,50	0,70
11	Kiesbelag fest	2,5	5,1	0,70	0,80	0,60	0,80
12	Kiesbelag locker	4,0	10,2	0,43	0,59	0,30	0,60
13	Schotterrasen	4,0	10,4	0,43	0,59	0,30	0,60
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	4,5	12,5	0,32	0,50	0,25	0,50
15	Rasengittersteine	6,0	15,4	0,15	0,39	0,15	0,40
16	befestigte Flächen (pauschal)	2,4	-	0,90	1,00	0,95	1,00
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	6,0	18,1	0,04	0,28	0,20	0,30

Tabelle A-6: Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Blockregenereignis der Dauer 2 h und einer Niederschlagshöhe von 35 mm ( $n = 0,1 \text{ a}^{-1}$ )

Einzelereignis als Blockregen mit $h_N = 35 \text{ mm}$ ; $D = 2 \text{ h}$							
Nr.	Flächenbefestigung	Verlusthöhen		Ergebnis		Richtwerte	
		$h_{v,B+M}$ [mm]	$h_{v,D}$ [mm]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	0,4	-	0,99	1,00	> 0,80	1,00
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
4	- Dachpappe	0,4	-	0,99	1,00	0,90	1,00
5	- Kies	3,0	2,8	0,84	0,92	0,70	0,90
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	4,5	5,5	0,71	0,84	0,50	0,80
7	- Aufbau $\geq 10 \text{ cm}$	6,0	10,9	0,52	0,69	0,30	0,60
8	Asphalt, fugenloser Beton	2,0	-	0,94	1,00	0,90	1,00
9	Pflaster fugendicht	2,0	2,9	0,86	0,92	0,75	0,90
10	Pflaster mit Fugen	3,0	7,9	0,69	0,77	0,50	0,70
11	Kiesbelag fest	2,5	5,3	0,78	0,85	0,60	0,80
12	Kiesbelag locker	4,0	10,9	0,58	0,69	0,30	0,60
13	Schotterrasen	4,0	11,0	0,57	0,69	0,30	0,60
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	4,5	13,1	0,50	0,63	0,25	0,50
15	Rasengittersteine	6,0	16,8	0,35	0,52	0,15	0,40
16	befestigte Flächen (pauschal)	2,4	-	0,93	1,00	0,95	1,00
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	6,0	21,6	0,21	0,38	0,20	0,30

### A.1.2 Modellregenspektrum

Tabelle A-7: Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Modellregenereignis der Dauer 1 h und einer Niederschlagshöhe von 15 mm ( $n = 1 \text{ a}^{-1}$ )

Einzelereignis als Modellregen mit $h_N = 15 \text{ mm}$ ; $D = 1 \text{ h}$							
Nr.	Flächenbefestigung	Verlusthöhen		Ergebnis		Richtwerte	
		$h_{v,B+M}$ [mm]	$h_{v,D}$ [mm]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	0,4	-	0,97	1,00	> 0,80	1,00
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
4	- Dachpappe	0,4	-	0,97	1,00	0,90	1,00
5	- Kies	3,0	1,3	0,71	0,91	0,70	0,90
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	4,5	3,2	0,49	0,79	0,50	0,80
7	- Aufbau $\geq 10 \text{ cm}$	6,0	6,1	0,19	0,59	0,30	0,60
8	Asphalt, fugenloser Beton	2,0	-	0,87	1,00	0,90	1,00
9	Pflaster fugendicht	2,0	1,3	0,78	0,91	0,75	0,90
10	Pflaster mit Fugen	3,0	3,3	0,58	0,78	0,50	0,70
11	Kiesbelag fest	2,5	2,3	0,68	0,84	0,60	0,80
12	Kiesbelag locker	4,0	4,1	0,46	0,72	0,30	0,60
13	Schotterrasen	4,0	4,3	0,44	0,71	0,30	0,60
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	4,5	4,2	0,42	0,72	0,25	0,50
15	Rasengittersteine	6,0	4,9	0,27	0,67	0,15	0,40
16	befestigte Flächen (pauschal)	2,4	-	0,84	1,00	0,95	1,00
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	6,0	7,1	0,12	0,53	0,20	0,30

Tabelle A-8: Mittlerer Abflussbeiwert und Endabflussbeiwert für ein Modellregeneignis der Dauer 2 h und einer Niederschlagshöhe von 25 mm ( $n = 0,3 \text{ a}^{-1}$ )

Einzelereignis als Modellregen mit $h_N = 25 \text{ mm}$ ; $D = 2 \text{ h}$							
Nr.	Flächenbefestigung	Verlusthöhen		Ergebnis		Richtwerte	
		$h_{v,B+M}$ [mm]	$h_{v,D}$ [mm]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]	$\psi_m$ [-]	$\psi_e$ [-]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	0,4	-	0,98	1,00	> 0,80	1,00
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0,2	-	0,99	1,00	> 0,90	1,00
4	- Dachpappe	0,4	-	0,98	1,00	0,90	1,00
5	- Kies	3,0	2,4	0,78	0,90	0,70	0,90
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	4,5	4,4	0,64	0,82	0,50	0,80
7	- Aufbau $\geq 10 \text{ cm}$	6,0	7,3	0,47	0,71	0,30	0,60
8	Asphalt, fugenloser Beton	2,0	-	0,92	1,00	0,90	1,00
9	Pflaster fugendicht	2,0	2,6	0,82	0,90	0,75	0,90
10	Pflaster mit Fugen	3,0	4,7	0,69	0,81	0,50	0,70
11	Kiesbelag fest	2,5	3,7	0,75	0,85	0,60	0,80
12	Kiesbelag locker	4,0	5,1	0,64	0,80	0,30	0,60
13	Schotterrasen	4,0	5,3	0,63	0,79	0,30	0,60
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	4,5	5,6	0,60	0,78	0,25	0,50
15	Rasengittersteine	6,0	5,8	0,53	0,77	0,15	0,40
16	befestigte Flächen (pauschal)	2,4	-	0,90	1,00	0,95	1,00
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	6,0	9,1	0,40	0,64	0,20	0,30

## A.2 Berechnungsergebnisse des Spitzenabflussbeiwertes aus Einheitsflächenbetrachtung

Tabelle A-9: Spitzenabflussbeiwert für zehnminütige Blockregenerenisse

Spitzenabflussbeiwerte für 10-minütigen Blockregen					
Nr.	Flächenbefestigung	Blockregenspende $r_{10}$ [l/s-ha]			
		150 (n = 1)	200 (n = 0.5)	270 (n = 0.2)	350 (n = 0.1)
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0,99	1,00	1,00	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	0,99	0,99	0,99	0,99
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0,99	1,00	1,00	1,00
4	- Dachpappe	0,99	0,99	0,99	0,99
5	- Kies	0,83	0,87	0,91	0,93
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	0,59	0,76	0,82	0,86
7	- Aufbau $\geq$ 10 cm	0,01	0,46	0,63	0,73
8	Asphalt, fugenloser Beton	0,95	0,97	0,97	0,98
9	Pflaster fugendicht	0,82	0,87	0,90	0,92
10	Pflaster mit Fugen	0,67	0,75	0,81	0,86
11	Kiesbelag fest	0,74	0,81	0,86	0,89
12	Kiesbelag locker	0,51	0,61	0,71	0,78
13	Schotterrasen	0,28	0,52	0,68	0,75
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	0,12	0,38	0,58	0,68
15	Rasengittersteine	0,00	0,24	0,49	0,64
16	befestigte Flächen (pauschal)	0,95	0,96	0,97	0,98
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	0,00	0,16	0,41	0,57



Tabelle A-10: Spitzenabflussbeiwert für 15-minütige Blockregenereignisse

Spitzenabflussbeiwerte für 15-minütigen Blockregen					
Nr.	Flächenbefestigung	Blockregenspende $r_{15}$ [l/s-ha]			
		120 (n = 1)	150 (n = 0.5)	215 (n = 0.2)	270 (n = 0.1)
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	1,00	1,00	1,00	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	1,00	1,00	1,00	1,00
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	1,00	1,00	1,00	1,00
4	- Dachpappe	1,00	1,00	1,00	1,00
5	- Kies	0,87	0,90	0,93	0,94
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	0,69	0,77	0,88	0,91
7	- Aufbau $\geq$ 10 cm	0,25	0,46	0,66	0,76
8	Asphalt, fugenloser Beton	1,00	1,00	1,00	1,00
9	Pflaster fugendicht	0,83	0,87	0,91	0,92
10	Pflaster mit Fugen	0,67	0,73	0,81	0,85
11	Kiesbelag fest	0,75	0,80	0,86	0,89
12	Kiesbelag locker	0,45	0,57	0,70	0,76
13	Schotterrasen	0,37	0,53	0,72	0,79
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	0,13	0,35	0,60	0,71
15	Rasengittersteine	0,00	0,21	0,51	0,64
16	befestigte Flächen (pauschal)	1,00	1,00	1,00	1,00
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	0,00	0,07	0,41	0,57

Tabelle A-11: Spitzenabflussbeiwert für 20-minütige Blockregenereignisse

Spitzenabflussbeiwerte für 20-minütigen Blockregen					
Nr.	Flächenbefestigung	Blockregenspende $r_{20}$ [l/s-ha]			
		100 (n = 1)	130 (n = 0.5)	175 (n = 0.2)	220 (n = 0.1)
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	1,00	1,00	1,00	1,00
2	- Ziegel, Dachpappe	1,00	1,00	1,00	1,00
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	1,00	1,00	1,00	1,00
4	- Dachpappe	1,00	1,00	1,00	1,00
5	- Kies	0,85	0,88	0,91	0,93
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	0,75	0,81	0,87	0,90
7	- Aufbau $\geq$ 10 cm	0,24	0,50	0,66	0,74
8	Asphalt, fugenloser Beton	1,00	1,00	1,00	1,00
9	Pflaster fugendicht	0,80	0,84	0,88	0,91
10	Pflaster mit Fugen	0,60	0,69	0,77	0,82
11	Kiesbelag fest	0,70	0,77	0,83	0,86
12	Kiesbelag locker	0,35	0,50	0,63	0,70
13	Schotterrasen	0,38	0,57	0,70	0,77
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	0,10	0,38	0,57	0,67
15	Rasengittersteine	0,00	0,25	0,51	0,62
16	befestigte Flächen (pauschal)	1,00	1,00	1,00	1,00
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	0,00	0,08	0,40	0,54

### A.3 Berechnungsergebnisse aus der Betrachtung ganzer Einzugsgebiete

Tabelle A-12: Berechnungsergebnisse für Einzugsgebiete 1 – Szenario1 für ein zweistündiges Blockregenereignis mit einer Niederschlagshöhe von 25 mm

Einzugsgebiet 1 / Szenario 1: Blockregenereignis mit $h_N = 25 \text{ mm}$ ; $D = 2 \text{ h}$				
Nr.	Flächenbefestigung	$A_i$ [ha]	$h_{v,D}$ [mm]	$V_V$ [m <sup>3</sup> ]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0,1	0,0	0,0
2	- Ziegel, Dachpappe	1,4	0,0	0,0
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0,1	0,0	0,0
4	- Dachpappe	0,1	0,0	0,0
5	- Kies	0,2	2,75	5,5
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	0,1	5,22	5,2
7	- Aufbau ≥ 10 cm	0,0	10,09	0,0
8	Asphalt, fugenloser Beton	0,6	0,00	0,0
9	Pflaster fugendicht	0,4	2,83	11,3
10	Pflaster mit Fugen	0,5	7,69	38,5
11	Kiesbelag fest	0,05	5,06	2,5
12	Kiesbelag locker	0,05	10,17	5,1
13	Schotterrasen	0,05	10,37	5,2
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	0,3	12,50	37,5
15	Rasengittersteine	0,05	15,35	7,7
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	6,0	18,09	1085,4
Berechnung der Abflussbeiwerte für das Gesamteinzugsgebiet				
	Versickerungsverluste $V_D$	1204	[m <sup>3</sup> ]	
	Niederschlagsvolumen $V_N$	2500	[m <sup>3</sup> ]	
	<b>Endabflussbeiwert <math>\psi_e</math></b>	<b>0,52</b>	<b>[-]</b>	
	Volumen Effektivniederschlag $V_{N,eff}$	863	[m <sup>3</sup> ]	
	Verlustvolumen $V_{V,B+M+D}$	1637	[m <sup>3</sup> ]	
	<b>mittlerer Abflussbeiwert <math>\psi_m</math></b>	<b>0,35</b>	<b>[-]</b>	

Tabelle A-13: Berechnungsergebnisse für Einzugsgebiete 1 – Szenario1 für ein zweistündiges Modellregenereignis mit einer Niederschlagshöhe von 25 mm

Einzugsgebiet 1 / Szenario 1: Modellregenereignis mit $h_N = 25 \text{ mm}$ ; $D = 2 \text{ h}$				
Nr.	Flächenbefestigung	$A_i$ [ha]	$h_{v,D}$ [mm]	$V_v$ [m <sup>3</sup> ]
1	Schrägdach - Metall, Glas, etc.	0,1	0,0	0,0
2	- Ziegel, Dachpappe	1,4	0,0	0,0
3	Flachdach - Metall, Glas, etc.	0,1	0,0	0,0
4	- Dachpappe	0,1	0,0	0,0
5	- Kies	0,2	2,55	5,1
6	Gründach - Aufbau < 10 cm	0,1	5,10	5,1
7	- Aufbau ≥ 10 cm	0,0	9,74	0,0
8	Asphalt, fugenloser Beton	0,6	0,00	0,0
9	Pflaster fugendicht	0,4	2,75	11,0
10	Pflaster mit Fugen	0,5	6,90	34,5
11	Kiesbelag fest	0,05	4,83	2,4
12	Kiesbelag locker	0,05	8,23	4,1
13	Schotterrasen	0,05	8,38	4,2
14	Fugen-Verbundsteine, Sickersteine	0,3	8,38	25,1
15	Rasengittersteine	0,05	8,61	4,3
17	nicht befestigte Flächen (pauschal)	6,0	11,73	703,8
Berechnung der Abflussbeiwerte für das Gesamteinzugsgebiet				
	Versickerungsverluste $V_D$	800	[m <sup>3</sup> ]	
	Niederschlagsvolumen $V_N$	2500	[m <sup>3</sup> ]	
	<b>Endabflussbeiwert <math>\psi_e</math></b>	<b>0,68</b>	<b>[-]</b>	
	Volumen Effektivniederschlag $V_{N,eff}$	1267	[m <sup>3</sup> ]	
	Verlustvolumen $V_{v,B+M+D}$	1233	[m <sup>3</sup> ]	
	<b>mittlerer Abflussbeiwert <math>\psi_M</math></b>	<b>0,51</b>	<b>[-]</b>	