

Universität Duisburg-Essen
Fachbereich Bauwissenschaften
Fachgebiet Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft

**Retentionswirkung und Stoffrückhalt
von ausgewählten
wasserdurchlässig befestigten Verkehrsflächen**

Dem zuständigen Fachbereich Bauwissenschaften der
Universität Duisburg-Essen vorgelegte Dissertation zur
Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Stefan Fach,
geboren am 1. Januar 1974 in Essen

Tag der mündlichen Prüfung: 30. Oktober 2006

Referent: Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Rauch
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Werner Richwien
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Renatus Widmann

Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft
Universität Duisburg-Essen

Heft 28

Stefan Fach

**Retentionswirkung und Stoffrückhalt von ausgewählten
wasserdurchlässig befestigten Verkehrsflächen**

Shaker Verlag
Aachen 2007

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2007

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-5855-9

ISSN 1616-6035

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Der Beginn aller Wissenschaften ist das Erstaunen,
dass die Dinge sind, wie sie sind.
(Aristoteles, griechischer Philosoph, 384 - 322 v. Chr.)

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Promotionsarbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft der Universität Duisburg-Essen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Rauch von der Universität Innsbruck, der durch die kurzfristige Übernahme der Gutachtertätigkeit sichergestellt hat, dass mein Promotionsverfahren erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Ebenso danke ich Herrn Professor Richwien für die Übernahme des Korreferats, die kritische Durchsicht der Arbeit und die wertvollen Anmerkungen. Bei dem Vorsitzenden der Prüfungskommission, Herrn Professor Widmann, möchte ich mich für seine Unterstützung bei der Abwicklung meines Promotionsverfahrens bedanken.

Meinen Kolleginnen und Kollegen möchte ich dafür danken, dass sie mich bei meiner Promotionsarbeit durch anregende Diskussionen und Denkanstöße unterstützt haben sowie hilfreich zur Seite standen. Sie haben dazu beigetragen, dass mir die Zeit an der Universität Duisburg-Essen trotz der mit dieser Arbeit verbundenen Anstrengungen angenehm in Erinnerung bleiben wird. Auch werde ich gerne an die Zusammenarbeit mit Mitarbeitern des Geologisch-Paläontologischen Instituts der Westfälischen Wilhelms-Universität und der geotechnischen Abteilung der DMT GmbH zurückdenken, durch die mir eine neue Sichtweise auf scheinbar alt Bekanntes ermöglicht wurde.

Ganz viel Dank geht an meine studentischen Hilfskräfte für deren Engagement bei der Versuchsbetreuung. So haben mich im Labor Frau Nadine Boes und Frau Nadide Dikmen bei den Batch- und Trogversuchen tatkräftig unterstützt. Bei den halbertechnischen Versuchen haben Herr Markus Brzoska, Herr Eugen Fink und Herr Klaus Kordowski durch Ihren körperlichen Einsatz beim Einbau der Straßenbaukörper in die Lysimeter und die auch an Wochenenden und Feiertagen erfolgte Beprobung mit zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Ebenso gebührt Herrn Jürgen Bischoff für die zahllosen Schwermetallanalysen mittels ICP-OES mein Dank.

Herr Bernd Mertes war mir aufgrund seiner guten Kenntnisse im Umgang mit Simulationssoftware eine wertvolle Hilfe bei der Modellierung der Strömungsvorgänge und des Stofftransportes mit dem Sickerwasser. Frau Ilka Erler möchte ich für die Erstellung zahlreicher Zeichnungen für meine Konferenzvorträge und diese Arbeit meinen Dank aussprechen. Bei Herrn Jan Deeken bedanke ich mich für das kritische Gelesen meines Manuskriptes auf die korrekte Verwendung der deutschen Sprache.

Abschließend danke ich herzlich meinen Eltern und meiner Schwester, dass sie mir das nötige Vertrauen gegeben haben, diese Arbeit erfolgreich zu Ende zu bringen.

Inhalt

	Seite
Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Bilder	V
Verzeichnis der Tabellen	X
1 Veranlassung	1
1.1 Problematik	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Kenntnisstand zur Versickerung von Straßenabflüssen	5
2.1 Charakterisierung des Niederschlags und des Oberflächenabflusses	5
2.1.1 Intensität, Dauer und Wiederkehrhäufigkeit des Niederschlags	6
2.1.2 Beschreibung des Abflussverhaltens von teildurchlässigen Oberflächen	9
2.1.3 Atmosphärische, nutzungsbedingte, methodikspezifische und klimatische Einflussfaktoren auf die Stoffbelastung von Niederschlagsabflüssen	12
2.1.4 Wasserinhaltsstoffe im Abfluss von Dachflächen	15
2.1.5 Wasserinhaltsstoffe im Abfluss von Straßenflächen	17
2.2 Anforderungen an die Niederschlagswasserversickerung und bautechnische Ausführungsformen von wasserdurchlässig befestigten Verkehrsflächen	21
2.2.1 Anforderungen an die Niederschlagswasserversickerung und an die zu verwendenden Baustoffe aus Gesetzen, Verordnungen und Regelwerken	21
2.2.2 Bautechnische Anforderungen und Ausführungsformen bei der Entwässerung über wasserdurchlässig befestigte Verkehrsflächen	26
2.3 Stoffrückhalt durch Adsorption und dessen Bestimmung in Batchversuchen	31
2.3.1 Beschreibung und Einteilung der Adsorption nach den wirksamen Mechanismen	31
2.3.2 Einflussfaktoren auf die Adsorption bei der Durchführung von Batchversuchen	33
2.3.3 Vergleich der Adsorptionskapazität von Batchversuchen mit Säulenversuchen	38
2.4 Prozesse des Fließvorganges und des Stofftransportes bei der Versickerung von Niederschlagsabflüssen über poröse Medien und deren Anwendung in der Modellierung zur Erstellung einer Sickerwasserprognose	40
2.4.1 Beschreibung des Fließvorganges für ungesättigte poröse Medien	40

2.4.2	Beschreibung des Stoffrückhaltes durch Filtration und Adsorption	44
2.4.3	Beschreibung des Stofftransportes durch Advektion, Diffusion und Dispersion	48
2.4.4	Eindimensionale Modellierung des Schwermetalltransportes in einer Bodensäule und unterhalb eines Versickerungsbeckens mit iterativ bestimmten Adsorptionskoeffizienten nach HENRY	52
2.4.5	Zweidimensionale Modellierung des Schwermetallrückhaltes wasserdurchlässig befestigte Verkehrsflächen unter Verwendung des linearen Ansatzes von HENRY mit gemessenen Adsorptionskoeffizienten	55
2.4.6	Eindimensionale Modellierung der Schwermetallanreicherung eines Bodens über einen Kombinationsansatz von „günstigen“ und „ungünstigen“ Adsorptionskoeffizienten nach FREUNDLICH	58
2.5	Stand der Wissenschaft zu Möglichkeiten der dezentralen Behandlung von Straßenabflüssen und ihren Inhaltsstoffen und zur Entsiegelungswirkung von wasserdurchlässig befestigten Verkehrsflächen	61
2.5.1	Untersuchungen zum Stoffrückhalt gängiger Verfahren zur Versickerung des Straßenabflusses einer Gemeindestraße in Augsburg mit 7.500 Kfz/d	62
2.5.2	Wirksamkeit der physikalisch-chemischen Behandlung von Straßenabflüssen am Beispiel einer Verbindungsstraße in Kirchberg (Schweiz) mit 17.000 Kfz/d	67
2.5.3	Behandlung des Straßenabflusses einer Schnellstraße mit 155.000 Kfz/d in einem „Partial Exfiltration Trench/ Reactor“ in Cincinnati (OH, USA)	71
2.5.4	Versickerungsleistung und Stoffrückhaltevermögen unterschiedlicher Rigolenmaterialien eines Parkplatzes mit 500 Stellplätzen in Bergkamen	76
2.5.5	Entsiegelungswirkung verschiedener Oberbauarten am Beispiel eines Parkplatzes mit 41 Versuchsflächen in Lingen	82
3	Bewertung der Straßenbaustoffe im Hinblick auf die maximale Adsorptionskapazität unter Berücksichtigung von Ionenkonkurrenz	89
3.1	Charakterisierung der Mineralstoffe und Deckbeläge hinsichtlich Korngrößenverteilung, Durchlässigkeitsbeiwert, Organikgehalt und Porenverteilung	89
3.1.1	Auswahl der Straßenbaumaterialien	90
3.1.2	Korngrößenverteilung der Lockermaterialien	92
3.1.3	Durchlässigkeit der Lockermaterialien und des haufwerksporigen Betonsteins	94

3.1.4	Organikgehalt der Lockermaterialien und der Deckbeläge	96
3.1.5	Porengrößenverteilung der Betonpflastersteine	97
3.2	Herstellung der Versuchslösung zur Nachbildung von Dach- und Straßenabflüssen	98
3.2.1	Stoffliche Zusammensetzung von Dach- und Straßenabflüssen aus Literaturdaten	99
3.2.2	Herstellung der Versuchslösungen mit Schwermetallsalzen	100
3.2.3	Herstellung der Versuchslösungen mit Fluoranthren und Phenanthren	102
3.3	Ermittlung der Adsorptionskapazität in Batch- und Trogversuchen	103
3.3.1	Festlegung des Lösungs-Feststoff-Verhältnisses für die Adsorptionsversuche	104
3.3.2	Aufbereitung des Probenmaterials für die Batch- und Trogversuche	105
3.3.3	Durchführung der Batchversuche zur Bestimmung der Adsorptionskapazität	105
3.3.4	Trogversuche zur Überprüfung des Oberflächeneinflusses auf die Adsorption	107
3.4	Bewertung der materialspezifischen Adsorptionskapazität hinsichtlich des Rückhalts von wassergefährdenden Inhaltsstoffen aus Dach- und Straßenabflüssen	109
3.4.1	Erstellung von Adsorptions-Isothermen für die Straßenbaustoffe	109
3.4.2	Abgeleitete Adsorptions-Isothermen der körnigen Straßenbaustoffe für die anorganischen und organischen Versuchslösungen aus den Batchversuchen	110
3.4.3	Einfluss von Probenaufbereitung und Verweilzeit auf die Adsorptionskapazität	112
3.4.4	Bedeutung des pH-Wertes für die Adsorptionskapazität	115
3.4.5	Maximal erreichbarer Rückhalt und Erschöpfungsdauer der Straßenbaustoffe	116
4	Halbtechnische Versuche zur Bestimmung des schichtspezifischen Stoffrückhaltevermögens von wasserdurchlässig befestigten Verkehrsflächen	125
4.1	Charakterisierung der halbtechnischen Versuchsanlage und Straßenkörper	125
4.1.1	Aufbau des Straßenkörpers in den Lysimeterkammern der Versuchsanlage	126
4.1.2	Aufbau der halbtechnischen Versuchsanlage zur Beregnung des Straßenkörpers	127
4.1.3	Pumpensteuerung sowie Aufzeichnung von Temperatur und pH-Wert des Sickerwassers über Analogschnittstelle der Messwerterfassungskarte	128

4.2	Versuchsdurchführung zur Ermittlung des schichtspezifischen Stoffrückhalts	130
4.2.1	Einbau des Straßenkörpers in das Lysimeter der Versuchsanlage	130
4.2.2	Beregnung der Straßenkörper mit schwermetallhaltigem Wasser	132
4.3	Beurteilung des schichtspezifischen Stoffrückhaltermögens für verschiedene Bauweisen nach viertägiger Beregnung mit schwermetallhaltigem Wasser	133
4.3.1	Konzentrationsganglinie infolge Beregnung mit schwermetallhaltigem Wasser	134
4.3.2	Stoffrückhaltevermögen in Abhängigkeit der Bauweise unter Berücksichtigung der Fließgeschwindigkeit und der Zuflusskonzentration	138
5	Simulation von Infiltration und Stofftransport infolge 50-jähriger Niederschlagswasserversickerung mit der Methode Finiter Elemente	143
5.1	Kennwerte für die Beschreibung von Strömungsvorgängen in porösen Materialien	144
5.1.1	Durchflusswirksamer Hohlraumanteil, Haftwasser und Durchlässigkeit	144
5.1.2	Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung und Porenraumverteilung	145
5.2	Diskretisierung der Straßenbaukörper von vier Pflasterbauweisen	148
5.3	Festlegung von Randbedingungen und Anfangszuständen sowie Kalibrierung der hydraulischen und stofflichen Modellparameter	150
5.4	Sensitivitätsanalyse zur Bewertung des Einflusses auf den Stofftransport	153
5.5	Beschreibung des Simulationsmodells zur Berechnung der Stoffverlagerung infolge Versickerung von Niederschlagsabflüssen über 50 Jahre Betriebsdauer	156
5.6	Bewertung der Zuverlässigkeit von Finite-Element Berechnungen und Darstellung der Stoffverlagerung von vier Pflasterbauweisen nach 50-jähriger Betriebsdauer	159
5.6.1	Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung schnell durchflossener Materialien	159
5.6.2	Ergebnisse der Stofftransportmodellierung	163
6	Empfehlungen zum Betrieb und zum Einsatz wasserdurchlässig befestigter Verkehrsflächen in Abhängigkeit der Abflussfläche	169
7	Zusammenfassung und Ausblick	175
8	Literaturverzeichnis	181